



UFG

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GENÉTICA E
MELHORAMENTO DE PLANTAS**

**POTENCIAL GENÉTICO DE LINHAGENS DE FEIJÃO-
COMUM PRETO DESENVOLVIDAS EM SISTEMAS COM
FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO**

EMILY PAMELA CÁRDENAS VÁSCONEZ

Orientadora:

Prof.^a Patrícia Guimarães Santos Melo

Coorientadores:

Dr. Leonardo Cunha Melo

Dr.^a Nayana Valéria Costa

Fevereiro - 2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Emily Pamela Cardenas Vasconez

3. Título do trabalho

Potencial genético de linhagens de Feijão-comum preto desenvolvidas em sistemas com fixação biológica de nitrogênio

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Emily Pamela Cárdenas Vásconez, Discente**, em 12/03/2026, às 15:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Patricia Guimaraes Santos Melo, Professora do Magistério Superior**, em 19/03/2026, às 11:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6041262** e o código CRC **C3B5F864**.

Referência: Processo nº 23070.006311/2026-00

SEI nº 6041262

EMILY PAMELA CÁRDENAS VÁSCONEZ

**POTENCIAL GENÉTICO DE LINHAGENS DE FEIJÃO-COMUM PRETO
DESENVOLVIDAS EM SISTEMAS COM FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE
NITROGÊNIO**

Dissertação apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, da Escola de Agronomia, da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial à obtenção do título de Mestra em Genética e Melhoramento de Plantas.

Área de concentração: Genética e melhoramento de plantas

Orientadora:

Prof.^a Dr.^a Patrícia Guimarães Santo Melo

Coorientadores:

Dr. Leonardo Cunha Melo

Dr.^a Nayana Valéria Costa

Goiânia, GO- Brasil

2026

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Vasconez, Emily Pamela Cardenas
Potencial genético de linhagens de feijão-comum preto desenvolvidas em sistemas com fixação biológica de nitrogênio [manuscrito] / Emily Pamela Cardenas Vasconez. - 2026.
114 f. : 2026

Orientadora: Prof(a). Dra. Patrícia Guimarães Santos Melo; co-orientadora: Dra. Nayana Valéria Costa ; co-orientador: Dr. Leonardo Cunha Melo
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Agronomia (EA), Programa de Pós-graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, Goiânia, 2026.
Inclui: siglas, tabelas, grafico.

1. Phaseolus Vulgaris. 2. Seleção Multivariada. 3. Nodulação. 4. Adaptabilidade e Estabilidade. 5. Simbiose Rizóbio-planta.

I. Melo, Patrícia Guimarães Santos, orient. II. Costa, Nayana Valéria, co-orient. III. Melo, Leonardo Cunha , co-orient. IV. Título.

CDU 63



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE AGRONOMIA

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 03/2026 da sessão de Defesa de Dissertação de **Emily Pamela Cardenas Vasconez**, que confere o título de Mestra em Genética e Melhoramento de Plantas, na área de concentração em Genética e Melhoramento de Plantas.

Aos dezanove dias do mês de fevereiro de dois mil e vinte e seis, a partir das treze horas e trinta minutos, no Auditório Roland Vencovsky do Setor de Melhoramento de Plantas, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “Potencial genético de linhagens de Feijão-comum preto desenvolvidas em sistemas exclusivos de fixação biológica de nitrogênio”. Os trabalhos foram instalados pela Orientadora, Professora Doutora Patrícia Guimarães Santos Melo (EA/UFG), com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Doutora Nayana Valéria Costa (Embrapa Arroz e Feijão), coorientadora, Professora Doutora Polianna Alves Silva Dias (IF Goiano), membro titular externo e Doutor Helton Santos Pereira (Embrapa Arroz e Feijão), membro titular interno. Durante a arguição os membros da banca **fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido a candidata aprovada pelos seus membros. Proclamados os resultados pela Professora Patrícia Guimarães Santos Melo, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos dezanove dias do mês de fevereiro de dois mil e vinte e seis.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

Potencial genético de linhagens de Feijão-comum preto desenvolvidas em sistemas com fixação biológica de nitrogênio



Documento assinado eletronicamente por **Patrícia Guimaraes Santos Melo, Professora do Magistério Superior**, em 19/02/2026, às 17:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Helton Santos Pereira, Usuário Externo**, em 20/02/2026, às 12:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Polianna Alves Silva Dias, Usuário Externo**, em 22/02/2026, às 16:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Nayana Valéria Costa, Usuário Externo**, em 27/02/2026, às 15:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5967235** e o código CRC **3ECF42BC**.

Aos meus pais, Ivan e Patrícia, e ao meu irmão Bryan,
pelo amor e apoio incondicional.

DEDICO

AGRADECIMIENTOS

La presente tesis es el resultado de un proceso largo y exigente que, aunque estuvo lleno de desafíos, hoy demuestra que todo el esfuerzo valió la pena. Cada etapa recorrida contribuyo no solo a la obtención de este trabajo, sino también a mi crecimiento personal y profesional.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi orientadora, Patricia Melo, y a mis coorientadores, Nayana Costa y Leonardo Cunha Melo, por su guía constante, paciencia y compromiso a lo largo de este proceso. Gracias por compartir su conocimiento en cada etapa del desarrollo de esta tesis.

Agradezco profundamente a mis padres, por ser siempre mi mayor apoyo y fortaleza, por su amor incondicional y por alentarme en cada una de las decisiones que he tomado. Ustedes han sido el motor que me impulsó a seguir adelante y la fuerza que me permitió sacar a flote este proyecto, incluso en los momentos mas difíciles.

A mi hermano Bryan, le agradezco especialmente por su motivación constante y por cuidar de nuestros padres y de nuestros peritos, brindándome tranquilidad y paz mientras me encontraba lejos de casa. Su apoyo fu fundamental para que pudiera concentrarme plenamente en esta etapa.

Agradezco a la persona que Dios me puso en mi camino, Nayana, quien no solo compartió su conocimiento conmigo, sino que también supo brindarme consejos oportunos y brindarme apoyo emocional, haciendo mas llevadera y significativa esta experiencia tan enriquecedora.

Mi gratitud también se extiende a los profesores, por su enseñanza y por contribuir de manera directa e indirecta a mi formación académica.

Al programa de posgraduación en genética y mejoramiento de plantas, por el apoyo institucional y académico brindando durante mi formación.

A la universidad, por abrirme las puertas y hacer posible el intercambio cultural, y a GCUB y CAPES, por la oportunidad académica y la beca de estudios que hicieron realidad esta etapa tan importante de mi formación.

A Embrapa, así como a sus trabajadores y pasantes del programa de mejoramiento de frijol, por el espacio, el acompañamiento y el cuidado brindado a los experimentos utilizados en este trabajo.

Y, por último, pero no menos importante, agradezco a Dios, por estar siempre conmigo, guiar mis pasos, darme fortaleza en los momentos de dificultad y permitirme llegar hasta aquí.

RESUMO

CARDENAS. V.E.P **Potencial genético de linhagens de feijão-comum preto desenvolvidas em sistemas com fixação biológica de nitrogênio.** 2024. 114 f. Dissertação (Mestrado em Genética de melhoramento de plantas) – Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2024.¹

O feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma cultura de grande importância para alimentação e a economia brasileira, porém sua produção ainda depende, em grande parte, da adubação nitrogenada mineral, razão da baixa eficiência da fixação biológica de nitrogênio (FBN). Essa dependência eleva os custos de produção e gera impactos ambientais, o que torna necessário o desenvolvimento de cultivares mais eficientes para FBN e adaptadas aos sistemas sustentáveis de cultivo. Este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial genético de linhagens de feijão-comum preto, desenvolvidas em sistemas exclusivo de FBN, considerando sua resposta à adubação nitrogenada mineral e à inoculação com rizóbios, com o intuito de selecionar genótipos com alta estabilidade produtiva e com características promissoras de nodulação. Foram avaliadas 15 linhagens oriundas da população BRS FP403/BRS Esplendor, selecionada ao longo de ciclos de melhoramento conduzidos sem o uso de fertilizantes nitrogenados. Os experimentos realizados em campo foram conduzidos em delineamento de blocos casualizados com três repetições, em sete ambientes, sob duas fontes de N (adubação mineral nitrogenada e inoculação com rizóbio). Os caracteres avaliados foram produtividade de grãos (PROD), massa de 100 grãos (M100), rendimento de peneira (RP), avaliação visual de grãos (AVG), porcentagem de nitrogênio derivado da atmosfera (%Ndfa), teor de clorofila (TC) e nitrogênio total (Ntotal). Em casa de vegetação foram conduzidos dois experimentos sob inoculação com rizóbio, em delineamento de blocos casualizados com quatro repetições. Foram avaliados a massa seca total (MST), número de nódulos (NN), massa seca de nódulos (MSN), massa específica de nódulos (MEN) e área nodular (AN). Foram realizadas análises de variância individuais e conjuntas, análises de adaptabilidade e estabilidade pelo método WAAS/WAASY, correlação entre caracteres e aplicação do índice de seleção multivariado MGIDI. De forma geral, os resultados confirmam a existência de ampla variabilidade genética entre as linhagens de feijão-comum preto avaliadas, tanto para caracteres produtivos quanto para atributos associados à fixação biológica de nitrogênio. A avaliação sob condições contrastantes de suprimento de N permitiu identificar linhagens com desempenho consistente sob FBN, destacando-se CNFP 21675, CNFP 21640, CNFP 21660, CNFP 21685 e CNFP 21629, que reuniram bom desempenho agrônomico e maior estabilidade entre ambientes. A eficiência dos índices de adaptabilidade e estabilidade reforça a viabilidade de seleção de genótipos superiores em sistemas baseados exclusivamente em FBN. Esses resultados evidenciam que a condução da seleção nesse sistema é uma estratégia promissora para o desenvolvimento de cultivares adaptadas a sistemas de produção mais sustentáveis, com menor dependência de fertilizantes nitrogenados minerais e potencial redução dos impactos ambientais.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris*; simbiose rizóbio-planta; adaptabilidade e estabilidade; nodulação; seleção multivariada.

¹Orientadora: Prof.^a Dr.^a Patrícia Guimarães Santos Melo. EA - UFG

Coorientadores: Dr. Leonardo Cunha Melo e Dr.^a Nayana Valéria Costa. Embrapa Arroz e Feijão.

ABSTRACT

CARDENAS, V. E. P. **Genetic potential of black common bean lines developed under biological nitrogen fixation systems** 2024. 114 p. Dissertation (Master's degree in Plant Genetics and Breeding) – School of Agronomy, Federal University of Goiás, Goiânia, 2024.²

Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is a crop of great importance for food security and the Brazilian economy; however, its production still largely depends on mineral nitrogen fertilization due to the low efficiency of biological nitrogen fixation (BNF). This dependence increases production cost and generates environmental impacts, highlighting the need to develop cultivars with greater efficiency for BNF and better adaptation to sustainable cropping systems. The objective of this study was to evaluate the genetic potential of black common bean lines developed under exclusive BNF systems, considering their responses to mineral nitrogen fertilization and rhizobial inoculation, aiming to select genotypes with high yield stability and promising nodulation traits. Fifteen lines derived from the BRS FP403/BRS Esplendor population selected over successive breeding cycles conducted without the use of nitrogen fertilizers, were evaluated. Field experiments were carried out in a randomized complete block design with three replications across seven environments under two nitrogen sources (mineral nitrogen fertilization and rhizobial inoculation). The evaluated traits included grain yield (GY), 100-grain weight (HGW), sieve yield (SY), visual grain score (VGS), percentage of nitrogen derived from the atmosphere (%Ndfa), chlorophyll content (CC), and total nitrogen (TN). Two greenhouse experiments were conducted under rhizobial inoculation using a randomized complete block design with four replications. Total dry matter (TDM), number of nodules (NN), nodule dry matter (NDM), specific nodule mass (SNM), and nodular area (NA) were evaluated. Individual and combined analyses of variance were performed, along with adaptability and stability analyses using the WAAS/WAASY method, correlation analyses among traits, and application of the multivariate selection index MGIDI. Overall, the results confirm the existence of wide genetic variability among the evaluated black common bean lines, both for productive traits and for attributes associated with biological nitrogen fixation. Evaluation under contrasting nitrogen supply conditions allowed the identification of lines with consistent performance under BNF, particularly CNFP 21675, CNFP 21640, CNFP 21660, CNFP 21685, and CNFP 21629, which combined good agronomic performance with greater stability across environments. The efficiency of adaptability and stability indices reinforces the feasibility of selecting superior genotypes in systems based exclusively on BNF. These results demonstrate that conducting selection under this system is a promising strategy for developing cultivars adapted to more sustainable production systems, with reduced dependence on mineral nitrogen fertilizers and potential mitigation of environmental impacts.

Keywords: *Phaseolus vulgaris*; rhizobium-plant symbiosis; adaptability and stability; nodulation; multivariate selection.

²Advisor: Prof.^a Dr.^a Patrícia Guimarães Santos Melo. EA - UFG

Co-advisors: Dr. Leonardo Cunha Melo and Dr.^a Nayana Valéria Costa. Embrapa Arroz e Feijão.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 CULTURA DO FEIJÃO-COMUM.....	6
2.2 NITROGÊNIO.....	8
2.3 FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO (FBN)	10
2.4 CONTRIBUIÇÃO DA FBN PARA O FEIJÃO-COMUM	15
2.5 MELHORAMENTO GENÉTICO PARA FBN.....	16
2.6 INTERAÇÃO DE GENÓTIPOS COM AMBIENTES	18
2.9 CARACTERES RELACIONADOS À FBN.....	11
2.9.1 Número de Nódulos	12
2.9.2 Teor de clorofila.....	13
2.9.3 Biomassa da planta.....	13
2.9.4 Teor de nitrogênio na planta.....	14
2.9.6 Técnica de abundancia natural (N).....	14
3. MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1 MATERIAL GENÉTICO.....	22
3.2 EXPERIMENTOS DE CAMPO	23
3.2.1 Delineamento experimental e caracteres avaliados.....	23
3.2.2 Análises estatísticas.....	25
3.3 EXPERIMENTOS DE CASA DE VEGETAÇÃO	28
3.3.1 Delineamento experimental e caracteres avaliados.....	29
3.3.2 Análises estatísticas.....	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1 PRODUTIVIDADE DE GRÃOS.....	33
4.2 QUALIDADE DE GRÃOS	47
5. REFERÊNCIAS	76

1. INTRODUÇÃO

O feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma cultura de importância socioeconômica, amplamente cultivada e consumida no Brasil. Esta cultura, juntamente com o arroz, faz parte da dieta diária dos brasileiros (Ferreira et al., 2025).

No Brasil, a produção de feijão-comum nas três safras atingiu 2,6 milhões de toneladas em 2024, em uma área de 1,6 milhões de hectares (Embrapa Arroz e Feijão, 2025). No período de 1985 a 2024, a área de plantio de feijão-comum no Brasil sofreu uma redução de 3,2 milhões de hectares. No entanto, a produtividade aumentou 8% na safra 2024/23. Foram 2,9 milhões de toneladas de feijão produzidas em 2023/24, volume 2% maior que os 2,8 milhões de toneladas produzidas em 2023/23 (IBGE, 2024). Diante desse cenário de aumento de produtividade, torna-se fundamental compreender os fatores que contribuem para o desempenho da cultura, especialmente aqueles relacionados à nutrição nitrogenada.

O processo de fixação biológica de nitrogênio (FBN) ocorre a partir da interação das bactérias com as raízes das plantas para formar estruturas especializadas chamadas nódulos (Kamfwa *et al.*, 2017). Os rizóbios têm capacidade única de enriquecer o solo em que crescem dado o poder de fixar nitrogênio atmosférico (Beatriz *et al.*, 2019). Assim, a relação simbiótica entre leguminosas e bactérias fixadoras de nitrogênio é conhecida por ter um impacto positivo na agricultura e no meio ambiente. A FBN é o único meio natural de conversão de nitrogênio gasoso e amônia em composto relacionados e desempenha um papel fundamental nas funções e na biodiversidade do solo, no ciclo de nutrientes e nos serviços do ecossistema (Pelegrin et al., 2009)

A FBN é uma alternativa promissora para reduzir os impactos econômicos e ambientais do uso de fertilizantes nitrogenados, porém sua eficiência no feijão-comum é limitada por fatores bióticos e abióticos. Entre eles, destacam-se a baixa capacidade simbiótica das cultivares modernas e a competição entre estirpes nativas de rizóbio e aquelas inoculadas, decorrente da promiscuidade da planta hospedeira e da interação estirpe-cultivar. Além disso, a presença natural de rizóbio no solo, competindo por sítios de infecção, reduz o sucesso da inoculação, o que faz com que a adubação nitrogenada ainda seja amplamente recomendada para suprir a demanda da cultura (Pelegrin et al., 2009; Capelesso; Costa; Júnior, 2019; López et al., 2019).

Diante das mudanças climáticas previstas e da necessidade de sistemas agrícolas mais sustentáveis, torna-se fundamental o desenvolvimento e a seleção de linhagens de feijão-comum em ambientes com FBN, visando identificar genótipos capazes de manter elevada produtividade de grãos, com menor dependência de fertilizantes nitrogenados. Nesse contexto, a avaliação da estabilidade produtiva das linhagens, considerando a interação genótipo por ambiente, em condições contrastantes de FBN e adubação nitrogenada, é essencial para compreender a adaptação e a eficiência no uso de nitrogênio. Essa abordagem permite selecionar genótipos mais estáveis e produtivos, contribuindo para a redução gradual do uso de N mineral e para a rentabilidade da cultura (Simões et al., 2011; Alves et al., 2024).

A avaliação de caracteres relacionados à FBN é fundamental para orientar a seleção de genótipos superiores em programas de melhoramento, uma vez que esses caracteres permitem aumentar a dependência das plantas do N₂ atmosférico e reduzir o uso de fertilizantes nitrogenados, como destaca Yurgel, Miklas e Porter (2025). Entre esses caracteres, destaca-se a estimativa do nitrogênio derivado da atmosfera (%N_{DFA}) por meio de técnicas como a diluição isotópica de ¹⁵N, que fornece uma medida quantitativa e robusta da contribuição efetiva da FBN para as plantas, possibilitando a discriminação de diferenças genotípicas em condições de campo e casa de vegetação (Pacheco et al., 2014).

De forma complementar, a caracterização da nodulação, incluindo número, massa, atividade e distribuição dos nódulos, fornece informações fenotípicas importantes sobre a compatibilidade leguminosa-rizóbio e os mecanismos envolvidos na simbiose, sendo especialmente útil em etapas iniciais de seleção (Reinprecht et al., 2020). A integração dessas variáveis requer análises de correlação e índices de seleção para compreender as relações entre caracteres de FBN e produtividade de grãos, permitindo a seleção indireta quando medições diretas são onerosas (Dhillon et al., 2024; Herridge et al., 2003). Assim, o uso de índices de seleção multicareses constitui uma ferramenta estratégica para combinar informações de %N_{DFA}, nodulação e atributos agronômicos em um único critério, auxiliando os melhoristas na escolha mais eficiente de genótipos com maior potencial produtivo e adaptados a sistemas agrícolas sustentáveis (Golparvar et al., 2022).

Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o potencial genético de linhagens de feijão-comum preto, desenvolvidas em sistemas com fixação biológica de nitrogênio, considerando sua resposta à adubação nitrogenada mineral e à inoculação com

rizóbios, com o intuito de selecionar genótipos com alta estabilidade produtiva e com características promissoras de nodulação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CULTURA DO FEIJÃO-COMUM

O feijão-comum é botanicamente conhecido como *Phaseolus vulgaris* L., cujo gênero possui inúmeras espécies de importância agrônômica, para a agricultura familiar (CIAT.,1987). Globalmente, o feijão-comum é a leguminosa alimentar mais importante para cerca de 300 milhões de pessoas, a maioria vivendo em países em desenvolvimento. A cultura também é conhecida como “carne dos pobres”, sendo especialmente importante na dieta de mulheres e crianças. Além disso, também apresenta grande importância econômica, gerando renda para milhões de pequenos agricultores (Rodríguez et al., 2019).

O sistema reprodutivo da planta é do tipo autógama, ou seja, apresenta flores hermafroditas e se reproduz predominantemente por autopolinização. A fecundação do feijão-comum apresenta ainda cleistogamia, fenômeno pelo qual a fecundação ocorre antes da flor abrir-se completamente (Bevilaqua et al., 2013).

O centro de origem do feijão-comum é situado na América do Sul, muito provavelmente no sul do Equador e norte do Peru. Os feijões selvagens foram domesticados independentemente em toda faixa geográfica, desde a Argentina até o México, o que resultou em dois conjuntos gênicos distintos de feijão cultivado: o Andino, cuja domesticação ocorreu do Equador ao Sul; e o Mesoamericano com domesticação da Colômbia para o norte. Dentro dos conjuntos gênicos domesticados foram identificadas várias raças com base na morfologia da planta, distribuição geográfica e ecológica e informações moleculares. As cultivares do grupo Andino apresentam grãos de tamanho maior, como os do tipo branco, jalo e rajado. Já as cultivares do grupo Mesoamericano, possuem grãos menores como os do tipo carioca, preto, mulatinho, pinto e vermelho (Gallegos et al., 2007).

Por ser uma cultura de ciclo curto, o feijão-comum pode ser cultivado em três safras distintas no país, o que favorece a constante oferta do produto no mercado nacional. O feijão-

comum se destaca no Brasil por sua boa adaptação edafoclimática, sendo plantado praticamente o ano todo em várias regiões do país, com destaque para os estados do Paraná, Mato Grosso, Minas Gerais, Bahia, São Paulo e Goiás que são os maiores produtores. Assim, tem-se a primeira safra (safra das águas), cuja semeadura é realizada entre agosto e novembro, a segunda safra (safra da seca), semeada entre janeiro e março e a terceira safra (safra de inverno ou irrigada) em que o cultivo é feito de abril a julho. Ainda que estes períodos de plantio apresentem variações de ano para ano, a cultura possibilita colheita praticamente o ano inteiro, havendo sobreposição de safras em algumas regiões do país (Garcia; Sermarini; Trivelin, 2020).

A produtividade do feijão-comum no Brasil tem apresentado uma evolução notável desde 1985, refletindo avanços tecnológicos e melhorias nas práticas agrícolas. De acordo com dados da Embrapa Arroz e Feijão (2025), o rendimento por hectare aumentou significativamente, passando de valores inferiores a 800 kg ha⁻¹ na década de 80 para mais de 1.571 kg ha⁻¹ atualmente. Esse crescimento está associado à adoção de cultivares melhoradas, ao uso mais eficiente de insumos e à expansão do cultivo para regiões com condições edafoclimáticas mais favoráveis. Além disso, a produção total manteve-se estável ou em ascensão, mesmo diante das flutuações na área plantada, evidenciando maior eficiência no sistema produtivo do feijão.

Devido a ampla variabilidade genética existente na espécie, o feijão-comum apresenta um grande número de classes comerciais distintas, definidas de acordo com a forma, tamanho e cor dos grãos. A preferência dos consumidores pelas classes comerciais varia conforme o país, a região e até mesmo as microrregiões (Almeida., 2021). No Brasil, a preferência dos consumidores é pelos tipos carioca e preto que representam 79% e 17% da produção brasileira, seguido de apenas 4% para os demais tipos de grãos (Embrapa., 2023). Por isso, os programas de melhoramento brasileiros têm dedicado esforços principalmente para os grupos comerciais carioca e preto (Panhoca et al., 2021).

No Brasil, os pequenos produtores geralmente cultivam feijão-comum para subsistência usando mão de obra familiar e com baixo nível de tecnologia, obtendo um baixo nível de rendimento. No entanto, nos últimos anos a cultura foi intensificada e diversificada, pois foi possível mecanizar a colheita e, assim, melhorar seu potencial produtivo, levando à produção em larga escala e fazendo parte da rotação de culturas. Tradicionalmente, o feijão-

comum é cultivado no Centro-Sul do Brasil, enquanto no Norte e no Nordeste predomina o feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) (Souza et al., 2021).

Cultivares melhoradas superam a qualidade refletindo o potencial produtivo da cultura em condições ideais. Embora esse número esteja abaixo do potencial da cultura, que é cotado em mais de 4.000 kg ha⁻¹. Vários fatores contribuem para a baixa produtividade média do país, incluindo a baixa utilização de tecnologia, o controle fitossanitário inadequado, as condições climáticas adversas e o manejo inadequado de fertilizantes (Perondi et al., 2019).

Dentre os nutrientes essenciais às plantas, o nitrogênio (N) é o exigido em maiores quantidades pelo feijão-comum e seu manejo adequado pode contribuir para o aumento da produtividade. As deficiências desse nutriente causam reduções severas no crescimento das plantas, principalmente por meio da redução da taxa de crescimento e da expansão das folhas, o que reduz a área fotos-sinteticamente ativa. No entanto, as aplicações de N sem o conhecimento das necessidades do solo e das culturas levam a excesso de custos para os produtores, deficiências e desequilíbrios nutricionais que afetam diretamente a produtividade das culturas (Sandoval et al., 2012).

2.2 NITROGÊNIO

O nitrogênio (N) desempenha um papel fundamental no metabolismo das plantas como um macronutriente essencial para o crescimento e o desenvolvimento destas. É um componente dos ácidos nucleicos, proteínas e clorofila e influencia vários processos fisiológicos nas plantas. As vias do metabolismo do nitrogênio, como o metabolismo da arginina, o metabolismo da ureia e a assimilação da glutamina sintetase, são vitais para a germinação das sementes e o crescimento e desenvolvimento das plantas (Kabange et al., 2022).

O nitrogênio é absorvido pelas plantas na forma de nitrato (NO₃) ou amônio (NH₄), e essa absorção varia de acordo com o genótipo, a temperatura e o pH do solo (Ye et al., 2022). O nutriente é o mais absorvido pelas plantas em condições normais de cultivo. Portanto, ele também é o nutriente mais escasso para a maioria das culturas em todas as regiões do mundo. Assim, sua deficiência causa reduções severas no crescimento das culturas, principalmente por

meio da redução da taxa de crescimento e da expansão das folhas, o que reduz a área fotossinteticamente ativa (Sandoval et al., 2012).

A produção de fertilizantes nitrogenados envolve a síntese de amônia, um componente essencial na maioria dos fertilizantes nitrogenados, usando o processo Haber Bosch, que exige altas temperaturas e pressões, resultando em consumo significativo de energia e emissões de gases causadores do efeito estufa (Shifren, et al., 2021). Além disso, o uso ineficiente de fertilizantes nitrogenados faz com que mais da metade do nitrogênio aplicado seja perdido para meio ambiente, a partir dos processos de volatilização e lixiviação, afetando a qualidade do ar, da água e do solo (Rahmawati et al., 2022).

De acordo com dados de pesquisa, as recomendações de fertilização com nitrogênio (N) para o feijão-comum variam de acordo com o teor de matéria orgânica (MO) do solo e da cultura anterior (Pias et al., 2022). Foi demonstrado que as aplicações divididas de N aumentam o rendimento do feijão-comum em 32% em comparação com uma única aplicação, e todas as fontes de N testadas apresentam benefícios semelhantes aos da ureia, a incorporação de uma mistura de ureia revestida com enxofre polimérico e ureia convencional por meio da aplicação dividida de nitrogênio pode melhorar ainda mais a eficiência do uso de nitrogênio e o rendimento de grãos de feijão-comum (Cunha et al., 2011).

Embora o nitrogênio seja necessário para a alta produtividade das plantas, o uso excessivo de fertilizantes ricos em nitrogênio pode ter efeitos prejudiciais ao meio ambiente, enfatizando a necessidade de práticas agrícolas sustentáveis. Compreender como as plantas regulam a absorção, a alocação e a utilização do nitrogênio é fundamental para otimizar a produção agrícola e, ao mesmo tempo, minimizar o impacto ambiental (Choi et al., 2023). Neste sentido, a prática da inoculação de sementes com rizóbios para potencializar o processo de fixação biológica de nitrogênio, representa uma alternativa eficiente para aumentar a produtividade do feijão-comum, ao mesmo tempo em que contribui para a proteção dos recursos hídricos e para a redução das emissões de gases de efeito estufa associadas à produção de fertilizantes nitrogenados. Trata-se de uma tecnologia reconhecida como acessível, de fácil aplicação e que gera benefícios econômicos ao produtor (Capelesso et al., 2019).

2.3 FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO (FBN)

A fixação biológica de nitrogênio (FBN) é o processo pelo qual determinados procariotos convertem o nitrogênio atmosférico (N_2) em amônia (NH_3) por meio da atividade de enzimas extremamente sensíveis ao oxigênio como a nitrogenase (Payá-Tormo et al., 2022). Esse processo natural é fundamental para fornecer o N biologicamente disponível nos ecossistemas para as plantas. A associação entre as bactérias fixadoras de N e as leguminosas representa a maior contribuição do processo de FBN para a agricultura (Guo et al., 2023).

A escolha da cepa de rizóbio usada para inoculação pode ter um impacto sobre a eficiência da nodulação e da acumulação de nitrogênio nas plantas, destacando a importância de selecionar os parceiros simbióticos certos para obter a FBN ideal na cultura. Os gêneros de bactérias fixadoras de nitrogênio associados ao feijão-comum, incluem *Rhizobium*, *Sinorhizobium* e *Burkholderia*. Estudos destacaram a prevalência de espécies de *Rhizobium* em nódulos de feijão.

Os nódulos nas leguminosas se formam por meio de uma complexa relação simbiótica com bactérias rizobiais. Inicialmente os flavonoides secretados pelas raízes iniciam a produção de nódulos pelos rizóbios, desencadeando a infecção rizobial e a agamogênese do nódulo. O fator de transcrição *Nodule Initiation* (NIN), desempenha um papel crucial no controle de genes essenciais para esses processos, incluindo aqueles envolvidos na regulação do ácido giberélico (GA), que influencia a nodulação da raiz inibindo a infecção por rizóbios e promovendo a agamogênese do nódulo (Gao et al., 2023).

No entanto, é possível que sua eficiência de fixação seja perdida devido a fatores ambientais, práticas de manejo, integridade e número de nódulos de plantas e pelo tipo de microrganismos associados à raízes. Portanto, é necessário analisar a dinâmica desse elemento a partir de sua fixação, a fim de projetar e implementar estratégias para aproveitar o processo biológico e reduzir a aplicação de fertilizantes sem sacrificar a produtividade das culturas. No entanto, há várias limitações para quantificar a fixação de nitrogênio, por exemplo, o grau de complexidade do processo, os custos e a sensibilidade das técnicas, equipamentos de alta tecnologia, mão de obra qualificada e disponibilidade de reagentes, entre outros (Fonseca et al., 2019).

Os métodos tradicionais para avaliar a eficiência do uso de nitrogênio nas culturas eram baseados principalmente na medição da produção de matéria seca e da quantidade de nitrogênio fixado em diferentes partes da planta. Com o tempo, os estudos passaram a analisar mais detalhadamente os fatores envolvidos no ciclo do nitrogênio, considerando o solo (em diferentes profundidades), as plantas (como a presença de *Rhizobium*, nodulação, teor de ureídeos e leghemoglobina) e os microrganismos, já que a fixação de nitrogênio depende diretamente da atividade biológica de bactérias diazotóficas, tanto livres quanto em simbiose (Fonseca et al., 2019).

2.4 CARACTERES RELACIONADOS À FBN

A falta de métodos rápidos e econômicos para medir a fixação de nitrogênio limita o melhoramento genético. Caracteres como produção de grãos, fotossíntese e morfologia da raiz podem auxiliar na compreensão da simbiose. Estratégias de quantificação indireta, como a estimativa do percentual de nitrogênio derivado da atmosfera, auxiliam na detecção da utilização do nitrogênio pela planta. Assim, compreender esses caracteres e mapear sua genética oferece uma visão mais clara dos fatores genéticos que regulam a fixação de nitrogênio (Medeiros et al., 2010).

O teor de clorofila, o número de nódulos, a massa de nódulos, a biomassa da planta e o teor de nitrogênio são caracteres cruciais para determinar a saúde e a produtividade da cultura do feijão-comum. Estudos demonstraram que os sensores de clorofila podem ajudar a gerenciar o nitrogênio, calculando o índice de suficiência de clorofila (CSI) para otimizar a aplicação de fertilizantes nitrogenados (Menegol et al., 2015). Além disso, a fertilização com nitrogênio tem um impacto significativo na nodulação das raízes e na produção de grãos em cultivares de feijão-comum, e algumas cultivares apresentam maior eficiência quando inoculadas com *Rhizobium* em comparação com a fertilizantes com nitrogênio (Yagi et al., 2015). O uso de um medidor de clorofila demonstrou ser eficaz na detecção de deficiência de nitrogênio em plantas de feijão-comum, e as leituras estão bem correlacionadas com os níveis de nitrogênio e a concentração de nitrogênio nas folhas (Hasdiana et al., 2018). O monitoramento desses indicadores é essencial

para otimizar a produtividade da cultura e garantir a utilização eficiente do nitrogênio na cultura do feijão (Albuquerque et al., 2012).

A análise dos caracteres de nodulação, como número de nódulos, massa seca nodular e padrão de distribuição no sistema radicular, constitui uma abordagem essencial para a compreensão da interação leguminosa-rizóbio e dos processos que determinam o estabelecimento e o funcionamento da simbiose. Esses caracteres fornecem informações fenotípicas detalhadas sobre a capacidade da planta em reconhecer estirpes eficientes, sustentar nódulos ativos e regular o custo energético da FBN ao longo do ciclo da cultura. Além disso, a avaliação da nodulação permite identificar variações genéticas associadas à arquitetura radicular, à alocação de foto-assimilados e ao controle fisiológico da simbiose, aspectos diretamente relacionados à eficiência da FBN (Dhillon et al., 2024).

A utilização do índice MGIDI (*Multi-trait Genotype–Ideotype Distance Index*) é particularmente relevante quando se consideram os caracteres de nodulação no processo de seleção, pois permite integrar, em um único critério, informações sobre número de nódulos, massa seca nodular, atividade e eficiência dos nódulos, juntamente com outros atributos agronômicos. Ao empregar a análise fatorial, o MGIDI reduz a redundância entre caracteres de nodulação altamente correlacionados e contorna problemas de multicolinearidade, possibilitando uma avaliação mais precisa do desempenho simbiótico dos genótipos. Dessa forma, o índice favorece a identificação de materiais que não apenas apresentam elevada nodulação, mas que expressam uma nodulação funcionalmente eficiente e compatível com altos níveis de produtividade (Olivoto e Nardino 2021).

2.4.1 Número de Nódulos

As bactérias simbióticas formam nódulos nas raízes do hospedeiro que coletam o nitrogênio atmosférico e o convertem em amônia. A planta o utiliza durante o crescimento e, após a morte, o libera no solo a partir dos nódulos quebrados. Em contrapartida, como em todas as simbioses, as bactérias se alimentam dos carboidratos (açúcares) produzidos pelas plantas e absorvem carbono. O número de nódulos nas raízes do feijão-comum é um caráter crucial para

avaliar a eficiência simbiótica em leguminosas (Dias et al., 2017). A eficácia dessa simbiose é geralmente avaliada pelo número de nódulos formados. Estudos indicam que o número de nódulos pode variar significativamente, dependendo das condições ambientais e das cepas rizobiais específicas envolvidas. Por exemplo, pesquisas mostram que certas cepas podem levar à formação de 20 a 30 nódulos por planta, enquanto outras podem produzir apenas 5 a 10 nódulos (Chellem et al., 2024).

2.4.2 Teor de clorofila

A clorofila desempenha um papel essencial no processo de fotossíntese e é responsável pela cor verde característica das plantas, permitindo avaliar visualmente o estado da cultura. Um verde intenso e uniforme geralmente indica plantas saudáveis, como elevado teor de clorofila e bom funcionamento fisiológico. Em contraste, colorações amareladas (clorose) ou verde pálido sugerem redução no conteúdo de clorofila e possíveis anormalidades na saúde da planta, muitas vezes associadas à deficiência de nitrogênio ou à baixa eficiência na fixação biológica desse nutriente. Além disso, plantas jovens tendem a apresentar maior teor de pigmentos do que plantas já maduras. Os métodos não destrutivos, como o uso de um medidor de clorofila, foram validados para medir com precisão o conteúdo de clorofila em plantas sem a necessidade de amostragem destrutiva (Samsone et al., 2007).

A relação entre o conteúdo de clorofila e o nitrogênio (N) nas plantas é estreita e influencia diretamente tanto a eficiência fotossintética quanto o rendimento dos cultivos. Pesquisas indicam que, além de ser fundamental para a captura de luz, a clorofila reflete a eficiência de uso do nitrogênio pela planta, sendo um indicador importante do estado nutricional e do potencial produtivo da cultura (Santos et al., 2017).

2.4.3 Biomassa da planta

Conforme estudos, a biomassa do feijão-comum desempenha um papel importante na produção de energia e no rendimento da colheita, além de influenciar a microbiota do solo (Araujo et al., 2008). O aumento da biomassa do feijão-comum, especialmente durante o estágio reprodutivo, pode refletir uma maior eficiência na FBN, já que a planta estaria recebendo mais nitrogênio, permitindo o acúmulo de massa vegetal. Esse nitrogênio fixado pelas bactérias simbióticas melhora a saúde do solo e os processos de humificação, criando um ciclo sustentável em que a biomassa produzida pela planta também pode ser reciclada, gerando novos nutrientes. A relação entre a biomassa do feijão e a FBN se torna evidente, pois o aumento na massa de brotos e palha reflete uma planta bem nutrida, que fixa e utiliza o nitrogênio atmosférico de maneira mais eficaz (Flammer e Ioannou, 2015).

2.4.4 Teor de nitrogênio na planta

O teor de nitrogênio nas plantas de feijão é essencial para o crescimento, produção e qualidade nutricional, pois níveis adequados aumentam o teor de proteína, fundamental para a saúde das plantas e a nutrição humana. A fertilização com nitrogênio pode elevar significativamente o rendimento e o teor de proteína em cultivares de feijão-comum, mostrando um aumento linear com taxas maiores de aplicação (Jundt et al., 2022). Além disso, o nitrogênio da semente é crucial nos estágios iniciais de crescimento e afeta o estado nutricional do fósforo, importante para processos metabólicos nas plantas (Chávez et al., 2009).

2.4.5 Técnica de abundância natural (^{15}N)

A técnica da abundância natural de ^{15}N é um método valioso para quantificar a fixação biológica de nitrogênio em várias espécies de plantas e práticas agrícolas. Essa técnica aproveita a composição isotópica natural do nitrogênio para diferenciar entre o nitrogênio derivado de fontes atmosféricas e o do solo. Ela tem sido aplicada com eficácia em estudos sobre feijão-comum, leguminosas como adubo verde, ecótipos de palma de óleo e plantas

perenes lenhosas, revelando informações sobre sua capacidade de fixação de nitrogênio. (Fonseca et al., 2019). A técnica mede a proporção de isótopos estáveis de nitrogênio ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) nos tecidos vegetais. Ao comparar os valores de ^{15}N de plantas que se sabe dependerem exclusivamente do nitrogênio atmosférico como os das espécies-alvo, os pesquisadores podem estimar a porcentagem de nitrogênio derivado da atmosfera (%NDFa) (Boddey et al., 2000).

2.5 CONTRIBUIÇÃO DA FBN PARA O FEIJÃO-COMUM

A fixação biológica de nitrogênio (FBN) desempenha papel crucial no feijão-comum, especialmente em solos deficientes em N, contribuindo para o crescimento vegetal, produtividade e sustentabilidade agrícola. As principais espécies de rizóbios associadas à cultura, como *Rhizobium tropici* e *Rhizobium etli*, promovem nodulação eficiente, enquanto a coinoculação com *Azospirillum brasilense* pode aumentar ainda mais os rendimentos (Messias et al., 2023). Apesar do potencial da FBN, o feijão-comum frequentemente não satisfaz suas necessidades de N apenas por simbiose, devido à competição com rizóbios nativos, condições ambientais adversas e limitações genéticas das cultivares (Sánchez et al. 2018); Pereira et al., 2015a); Buetow et al., 2017).

A eficiência da FBN é influenciada por fatores abióticos, como estresse hídrico, altas doses de N mineral e indisponibilidade de outros nutrientes, além de fatores bióticos, como compatibilidade planta-rizóbio e capacidade competitiva das estirpes inoculadas (Gebremedhin, 2018; Milcheski et al., 2022). Estudos indicam que a seleção de cultivares com maior capacidade simbiótica, aliada à escolha de estirpes eficientes e persistentes, possibilita uma nodulação funcional ao longo do ciclo, aumentando a disponibilidade de N para fases críticas como florescimento e enchimento de grãos (Medeiros et al., 2010; Ribeiro et al., 2009).

O melhoramento genético é, portanto, essencial para ampliar a contribuição da FBN, promovendo genótipos capazes de formar nódulos ativos, sustentar a atividade da nitrogenase e interagir eficientemente com rizóbios competitivos. Combinada a práticas de manejo adequadas, essa abordagem reduz a dependência de fertilizantes nitrogenados, melhora a estabilidade produtiva e fortalece sistemas agrícolas mais sustentáveis (Alcantara et al., 2010; Xavier, 2009).

2.6 MELHORAMENTO GENÉTICO PARA FBN

A Embrapa iniciou suas atividades de melhoramento genético visando a otimização da fixação biológica de nitrogênio (FBN) no feijão-comum em 2007. O foco inicial consistiu na avaliação das principais cultivares e linhagens elite do programa de melhoramento, submetidas a dois tratamentos: adubação mineral nitrogenada e inoculação com estirpes selecionadas de rizóbios. Esses testes foram realizados ao longo de vários ciclos agrícolas, com o objetivo de identificar genótipos capazes de maximizar a eficiência da FBN, sem comprometer atributos agronômicos importantes, como produtividade de grãos, ciclo vegetativo, arquitetura de planta e resistência a doenças.

Esses genótipos apresentavam genes de interesse para diversos caracteres de importância agronômica. A aprovação dessas linhagens em sistemas que utilizam FBN seria uma inovação estratégica, já que permitiria a recomendação direta aos agricultores, promovendo a redução do uso de fertilizantes nitrogenados e, conseqüentemente, o custo de produção.

Estudos preliminares, realizados por Pereira et al. (2015) e Dias et al. (2020,2024), evidenciaram que, embora houvesse ganho consistente em produtividade sob adubação mineral nitrogenada, nenhum dos genótipos avaliados superou essa atuação em condições com FBN. Com base nesses achados, formulou-se a hipótese de que a limitação em ganhos com FBN poderia estar relacionada à necessidade de cruzamentos específicos, a fim de combinar genes de alta performance agronômica com genes que favorecessem a simbiose eficiente com rizóbios.

Com isso, iniciou-se um novo ciclo de cruzamento direcionados entre genótipos previamente identificados como promissores em condições de FBN. A estratégia adotada envolveu a criação de novas populações, a serem conduzidas inteiramente em ambientes de FBN, sem a interferência de adubação mineral nitrogenada, para potencializar a seleção de indivíduos com maior eficiência simbiótica.

No trabalho de Costa et al. (2025), 28 populações de grãos pretos provenientes de um dialelo completo foram avaliadas em três gerações distintas: F₂, F₃ e F₄, sob inoculação com rizóbios. A população mais promissora resultante desse processo foi a BRS FP403/BRS Esplendor, da qual foram selecionadas 76 plantas individuais. Essas plantas foram avaliadas em dois ambientes e após análise detalhada dos resultados, 15 linhagens foram selecionadas para

um estudo mais aprofundado. Atualmente essas, linhagens estão sendo avaliadas tanto em ambientes com adubação mineral nitrogenada quanto em sistemas baseados na fixação biológica de nitrogênio (FBN). como foram desenvolvidas exclusivamente sob inoculação com rizóbio, sem adubação nitrogenada durante todo o processo de seleção, apresentam elevado potencial de adaptação a sistemas de produção com FBN, devido à seleção sob condições que favorecem uma simbiose eficiente e maior autonomia no suprimento de nitrogênio.

Em outro estudo da mesma autora, avaliou-se a capacidade combinatória de genótipos de feijão comum preto desenvolvidos em sistema no qual a principal fonte de nitrogênio foi a FBN, visando identificar genitores e populações promissoras para programas de melhoramento. Em um dialelo completo entre oito linhagens, observou-se que o peso de 100 grãos foi predominante controlado por efeitos genéticos aditivos, favorecendo o avanço por seleção, enquanto o rendimento de grãos apresentou maior influência de efeitos não aditivos, destacando a importância de combinações específicas entre genitores. Foram identificados genitores superiores para cada caráter (Costa et al., 2025b).

O foco dos programas de melhoramento de feijão-comum é a melhoria da planta e seu produto, o grão. As principais características melhoradas são resistências às principais doenças da cultura, arquitetura, ciclo, qualidade de grão, e maior rendimento de grãos. Na produção de alimentos, a cultura do feijão-comum, provavelmente, é o que apresenta o ciclo mais curto. Sendo assim, a busca por cultivares que completem o ciclo em torno de 65 a 70 dias tem sido o objetivo de muitos programas de melhoramento (Heilig et al., 2017).

O controle genético de um caráter é fundamental para a compreensão do seu funcionamento genético. Estudos anteriores mostraram que o número de nódulos em plantas de feijão-comum aumentou após seleção recorrente, indicando hereditariedade do caráter. Isso sugere que o número de nódulos pode ser usado como critério para avaliar a capacidade de fixação de nitrogênio (Albuquerque et al., 2012).

A falta de métodos rápidos e econômicos para medir a fixação de nitrogênio ainda limita o avanço da melhoria genética em culturas. No entanto, caracteres como produção de grãos, eficiência fotossintética e morfologia das raízes podem servir como indicadores indiretos da qualidade da simbiose. Estratégias de quantificação indireta, como a estimativa do percentual de nitrogênio derivado da atmosfera, contribuem para avaliar a utilização do nitrogênio pelas plantas. Assim, a compreensão desses caracteres e o mapeamento genético associado permitem

uma visão mais aprofundada dos fatores genéticos que controlam a fixação de nitrogênio (Medeiros et al., 2010).

Trabalhos sobre a influência do nitrogênio mineral na FBN do feijão-comum ressaltam que a fertilização nitrogenada promove rendimento de grãos superior à inoculação com rizóbio; porém, doses crescentes de N mineral reduzem a formação de nódulos, caracterizando efeito inibitório sobre a nodulação (Xavier, 2009).

Para alcançar os melhores resultados com a FBN, é fundamental que o aporte de nitrogênio ocorra de forma contínua durante o desenvolvimento da planta, garantindo que suas necessidades nutricionais sejam supridas nas fases mais críticas. Nesse contexto, a FBN torna-se um componente indispensável para a sustentabilidade da agricultura brasileira, pois, além de aumentar a produtividade, fornece nitrogênio de maneira eficiente por meio da inoculação de sementes, apresentando baixo custo econômico e reduzindo significativamente o impacto ambiental (Caetano et al., 2023).

2.7 INTERAÇÃO DE GENÓTIPOS COM AMBIENTES

O cultivo de feijão-comum é altamente influenciado pelas condições ambientais, que variam amplamente em função do clima, tipo de solo e manejo agrícola. Essa diversidade de fatores provoca variações no desempenho das cultivares, tornando essencial compreender como diferentes genótipos respondem a ambientes distintos. Dessa forma, a seleção de materiais não deve se basear apenas na produtividade potencial, mas também na capacidade de adaptação e estabilidade frente as variações ambientais (Faria et al., 2009).

A diversidade das condições ambientais a que a cultura é submetida contribui para que ocorra a interação no desempenho relativo das cultivares em virtude das diferenças entre ambientes. Portanto, os materiais precoces, além de alta produtividade de grãos, devem ter um comportamento previsível e responder aos estímulos propostos pelo ambiente, as plantas não devem apresentar somente alta capacidade de produtividade de grãos, mas também alta estabilidade produtiva para obter boas produtividades de grãos em diferentes ambientes. Para reduzir o impacto dos efeitos da interação de G x A, estratificam-se geralmente genótipos ou

ambientes em grupos homogêneos, de modo que as interações dentro dos grupos sejam minimizadas (Albuquerque et al., 2023).

Considera-se a existência de duas condições que contribuem para a interação dos genótipos com o ambiente ao qual é submetido. A primeira é previsível e inclui as variações ambientais que ocorrem de local para local, dentro da área de distribuição da cultura. Entre as condições ambientais previsíveis estão características como clima, solo e técnicas agronômicas. A segunda condição é a variação imprevisível, como frequência e distribuição de chuvas, temperatura do ar e do solo e a ocorrência de geadas, entre outras, (Albuquerque et al., 2023).

Pereira et al. (2017) examinaram como fatores genéticos, ambientais e suas interações influenciam a produtividade e a qualidade comercial dos grãos, destacando a necessidade de selecionar genótipos que maximizem o desempenho em diferentes ambientes. Em um trabalho posterior, Pereira et al. (2018) aprofundou-se na interação G x E, especificamente em relação à resistência a doenças e outras características agronômicas importantes, oferecendo suporte para a recomendação de cultivares mais robustas. Torga et al. (2013) estudaram a interação entre cultivares de feijão-preto, anos, locais e épocas de semeadura, demonstrando que o desempenho das cultivares varia significativamente conforme as condições climáticas e geográficas, reforçando a necessidade de genótipos adaptados para cada situação. Por outro lado, Dias et al. (2020) avaliou linhagens elite de feijão-comum sob inoculação com *Rhizobium tropici* e adubação nitrogenada mineral, observando que a fertilização com N pode aumentar a produtividade das linhagens, embora nem todas respondam da mesma forma à FBN. O estudo também mostrou que os caracteres de nodulação, como número e massa de nódulos, atividade e índice de nodulação relativa, variam entre genótipo e podem ser utilizados para selecionar linhagens com maior capacidade simbiótica. A análise da interação genótipo por fonte de N (G x F) indicou efeitos significativos para alguns caracteres, mas não alterou a seleção das melhores linhagens, evidenciando que tanto a adaptabilidade quanto a estabilidade produtiva devem ser consideradas. Assim, os resultados reforçam que a escolha adequada do tipo de manejo nitrogenado, combinada à avaliação de características de nodulação, é fundamental para identificar as mais produtivas e com maior potencial de FBN, ajustadas às condições de cultivo específicas (Dias et al., 2024).

Caetano et al. (2024) avaliaram 15 linhagens elite de feijão-comum do grupo carioca, desenvolvidas sob FBN, em seis ambientes contrastantes, com e sem adubação

nitrogenada mineral, com foco na interação genótipo por ambiente e na estabilidade produtiva. A interação linhagem por ambiente foi significativa, evidenciando comportamento diferencial dos genótipos conforme as condições de cultivo. Alguns materiais apresentaram ampla adaptabilidade e estabilidade em diferentes sistemas, enquanto outros demonstraram adaptação específica sob inoculação. Os resultados confirmam a importância da análise da G x E para a identificação de genótipos com maior previsibilidade produtiva e potencial de recomendações para diferentes condições ambientais, além do uso dessas linhagens com genitores em novos ciclos de melhoramento.

2.8 ANÁLISES WAAS E WAASY

A condução de ensaios multiambientais é essencial em programas de melhoramento genético, pois permite identificar genótipos com maior adaptabilidade, estabilidade e produtividade em diferentes condições de cultivo. Dentro desse contexto, a análise AMMI tem sido amplamente utilizada por sua eficiência em modelar graficamente os componentes da interação G x A, embora apresente limitações na formulação de modelos lineares mistos (Duarte et al., 1999).

Para complementar essa análise, surgiram índices derivados do próprio AMMI, como o WAAS (*Weighted Average of Absolute Scores*), que não constitui um novo método estatístico, mas um índice sintetizado a partir dos escores dos componentes principais da interação (IPCA's). Conforme proposto por Pereira et al. (2009), o hoje denominado WAAS (Olivoto et al., 2019), é calculado como a média ponderada dos valores absolutos dos escores dos IPCA's de cada genótipo, sendo os pesos atribuídos de acordo com a proporção da variância explicada para cada componente principal. Dessa forma, o índice resume em um único valor a contribuição do genótipo para a interação G x A. Valores menores de WAAS indicam maior estabilidade, pois refletem menor desvio do desempenho médio ao longo dos ambientes e menor participação na interação.

Associado a ele, o índice WAASY amplia a interpretação ao integrar simultaneamente a estabilidade e o desempenho produtivo, funcionando como uma medida quantitativa de superioridade dentro do conjunto analítico do AMMI. Ambos os índices

permitem a elaboração de biplots semelhantes aos obtidos na análise tradicional, porém com a vantagem de incorporar pesos diferenciados e operar em um contexto compatível com modelos de efeitos mistos, proporcionando maior flexibilidade e robustez para investigação da interação G x A (Olivoto et al., 2019).

Segundo Caetano et al. (2023), a aplicação dos métodos WAASB e WAASBY na avaliação de genótipos de feijão-comum no Centro-Oeste possibilitou combinar precisão estatística com simplicidade na interpretação, tornando mais eficiente a identificação de genótipos que apresentam maior adaptação e estabilidade em diferentes ambientes.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 MATERIAL GENÉTICO

O material genético do presente estudo é composto por 15 linhagens da população BRS FP403/BRS Esplendor, desenvolvidas em condições de fixação biológica de nitrogênio (FBN). Dias et al. (2020) avaliaram 15 cultivares e linhagens elite de feijão-comum tipo preto em condições de inoculação com rizóbio. Foram selecionados oito genótipos promissores com base em estimativas de produtividade, estabilidade e adaptabilidade. Estes oito genótipos foram usados como genitores em cruzamentos dialélicos completos, resultando na formação de 28 populações segregantes (Costa et al., 2025a), que foram conduzidas em sistemas de FBN.

O genitor BRS FP403 apresentou as maiores estimativas de capacidade geral de combinação (CGC) para massa de 100 grãos, enquanto BRS Esplendor se sobressaiu pela elevada produtividade. A população resultante do cruzamento BRS FP403/BRS Esplendor revelou médias superiores e boa capacidade específica de combinação (CEC) para todas as características avaliadas, configurando-se como altamente promissora para a extração de linhagens superiores destinadas ao cultivo em FBN. Em avaliações subsequentes, Costa et al. (2024b) avaliaram 76 linhagens extraídas dessa população, durante dois anos, em ambientes com FBN. A partir desse conjunto, foram selecionadas as 15 linhagens de melhor desempenho: CNFP 21617, CNFP 21619, CNFP 21622, CNFP 21629, CNFP 21630, CNFP 21640, CNFP 21642, CNFP 21649, CNFP 21651, CNFP 21660, CNFP 21661, CNFP 21673, CNFP 21675, CNFP 21685 CNFP 21688, as quais juntamente com as testemunhas BRS Esplendor, BRS FP403 e BRS FP417, compõem o conjunto genético avaliado no presente estudo com base em caracteres agronômicas e de nodulação.

3.2 EXPERIMENTOS DE CAMPO

3.2.1 Delineamento experimental e caracteres avaliados

Os experimentos de campo foram compostos por 15 linhagens elite de feijão-comum preto oriundas da população BRS FP403/BRS Esplendor e as testemunhas BRS FP417, BRS FP403, BRS Esplendor e a linhagem não nodulante NORH54. Os experimentos foram conduzidos em três locais: Santo Antônio de Goiás (GO), Ponta Grossa (PR) e Brasília (DF), em diferentes épocas de semeadura (inverno, águas e seca) nos anos de 2023, 2024 e 2025, totalizando oito ambientes, conforme detalhado na Tabela 1. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, com três repetições e parcelas de três linhas de três metros de comprimento, espaçadas de 0,50 m.

Tabela 1. Informações geográficas dos estados, épocas de semeadura e anos de realização dos ensaios com genótipos de feijão-comum-preto, utilizando adubação nitrogenada mineral e inoculação com rizóbio e caracteres avaliados: produtividade de grãos (PROD-kg ha⁻¹), massa de 100 grãos (M100-g), rendimento de peneira (RP-%), avaliação visual de grãos (AVG-escala de notas), teor de clorofila (TC-SPAD), porcentagem de N derivado da atmosfera (NDFA-%) e teor de nitrogênio total (N Total-%).

Local/Época/Ano ¹	Informações geográficas			Caracteres avaliados						
	Alt ²	Lat ³	Long ⁴	PROD	M100	AVG	RP	TC	%NDFA	N Total
STA/Inverno/2023	823	16°29'	49°18'	X	X	X				
PG/Águas/2023	969	25°05'	50°09'	X	X					
BSB/DF/Inverno/2023	1171	15°46'	47°55'	X	X		X			
STA/Águas/2024	823	16°29'	49°18'	X				X	X	X
STA/Inverno/2024	823	16°29'	49°18'	X	X	X	X	X		
PG/Seca/2024	969	25°05'	50°09'	X	X	X	X			
PG/Águas/2024	969	25°05'	50°09'	X	X					
STA/Seca/2025	823	16°29'	49°18'						X	X

¹SAT: Santo Antônio de Goiás; PG: Ponta Grossa; BSB: Brasília; ²Altitude (m); ³Latitude; ⁴Longitude.

Em cada ambiente foram instalados dois experimentos, ambos com a adubação de P_2O_5 e K_2O no plantio, conforme análises de solo para cada local. No primeiro ensaio foi realizada adubação com N mineral na semeadura (20 kg ha^{-1} de N) e em cobertura (60 kg ha^{-1} de N) na forma de ureia, totalizando 80 kg ha^{-1} de N. No segundo não houve adubação com N mineral e foi realizada a inoculação com inoculante líquido preparado no Laboratório de Biologia do Solo da Embrapa Arroz e Feijão, composto pela mistura 1:1:1 das estirpes de *Rhizobium tropici* (SEMIA 4077 e 4088) e de *R. freirei* (SEMIA 4080), registradas junto ao MAPA para o feijão-comum. O inoculante apresenta uma densidade de 10^9 células mL^{-1} . A aplicação foi realizada no sulco de semeadura na ocasião do plantio, com auxílio de pulverizador de jato dirigido acoplado à plantadeira de parcelas, com dosagem de 100 ml ha^{-1} .

Os caracteres avaliados foram produtividade de grãos (kg ha^{-1}), massa de 100 grãos (g), aspecto visual de grãos (escala de notas), rendimento de peneira (%), teor de clorofila (SPAD), porcentagem de nitrogênio derivado da atmosfera (%) e nitrogênio total (N Total). A relação dos caracteres avaliados em cada ambiente pode ser encontrada na Tabela 1.

A produtividade de grãos (PROD), ajustada para 13% de umidade, foi obtida em gramas parcela^{-1} ao realizar a pesagem dos grãos colhidos das três linhas, com conversão para kg ha^{-1} . Para a obtenção do rendimento de peneira (RP%), utilizou-se uma amostra de 300 g de grãos, que foram submetidos à classificação em peneira de malha 4,25 mm (peneira 11), específica para grãos pretos. O RP% foi calculado pela relação entre a massa de grãos retidos na peneira e a massa total da amostra, multiplicada por 100, representando a proporção de grãos com padrão comercial. A partir dos grãos retidos na peneira determinou-se também a massa de 100 grãos (M100), obtida pela pesagem de 100 grãos coletados ao acaso de cada parcela, com determinação da massa em gramas. O aspecto visual dos grãos (AVG) foi determinado atribuindo-se notas de 1 (cor preta obscura, sem defeitos de forma) a nota 3 (grãos de coloração desuniforme, com defeitos de forma).

O teor de clorofila (TC) foi obtido a partir do equipamento SPAD-502Plus (Konica Minolta). Os dados das parcelas foram provenientes de dez leituras, em dez plantas aleatórias da parcela, utilizando os primeiros trifólios da planta. Foram realizadas quatro medições de teor de clorofila ao longo do ciclo da cultura, sempre pela manhã, no mesmo horário.

Para determinação da proporção de N derivado da atmosfera (%N DFA), amostras de tecido da parte aérea de cinco plantas aleatórias da parcela foram coletadas no início do

florescimento (estágio fenológico R6), apenas nos experimentos conduzidos sob inoculação com rizóbio. As plantas foram cortadas ao nível do solo, armazenadas em sacos de papel e secas em estufa a 60°C por três dias. Foi realizada uma primeira moagem em moinho de facas tipo Willey, na qual toda parte aérea foi processada. Depois, foi realizada uma segunda moagem utilizando um moinho de bolas, com o objetivo de reduzir ainda mais o tamanho das partículas e homogeneizar a textura. As amostras foram pesadas em micro balança para o acondicionamento de 4,5 mg de cada amostra em pequenas cápsulas de estanho. As análises foram realizadas em duplicata, o que é fundamental para o controle de qualidade das análises. As cápsulas foram enviadas para o Laboratório de Análises Agroambientais da Embrapa Arroz e Feijão, para determinação da abundância natural de ^{15}N .

A porcentagem de N derivado da atmosfera foi calculada conforme Shearer e Kohl (1986):

$$\% \text{Ndfa} = \frac{\delta^{15}\text{N}_{ref} - \delta^{15}\text{N}_{fix}}{\delta^{15}\text{N}_{ref} - B} \times 100$$

Em que $\delta^{15}\text{N}_{fix}$ e $\delta^{15}\text{N}_{ref}$ correspondem, respectivamente, à abundância natural de ^{15}N no feijão-comum inoculado e nas plantas de referência (linhagem não nodulante NORH54), e B é definido como o valor de $\delta^{15}\text{N}$ da planta fixadora de N_2 cultivada com a fixação biológica de nitrogênio (FBN) como fonte de N. O valor de B utilizado foi de -2,08%, determinado para cultivares de feijão comum cultivadas em sistema hidroaeropônico sem N, totalmente dependente da FBN (Sanches et al., 2017). O nitrogênio total (N total) foi utilizado como um indicador do estado nutricional e da capacidade de acumulação de nitrogênio pelas linhagens de feijão-comum preto avaliadas. Esse parâmetro foi determinado a partir das mesmas amostras utilizadas para avaliar o %NDFA. O nitrogênio total representou a quantidade de nitrogênio efetivamente absorvida e assimilada pelas plantas, independentemente de sua origem, seja proveniente da adubação nitrogenada mineral ou da fixação biológica de nitrogênio.

3.2.2 Análises estatísticas

Foi realizada a análise de variância individual para todos os caracteres em todos os ensaios, considerando-se os efeitos dos genótipos e fontes de N fixos. O modelo matemático adotado foi:

$$Y_{ijs} = m + g_i + d_s + b_{(s)j} + (gd)_{is} + e_{isj}$$

Em que:

Y_{ijs} : observação do genótipo i sob fonte de N s no bloco j ;

m : média geral;

g_i : efeito do genótipo i ;

d_s : efeito da fonte de N s ;

$b_{(s)j}$: efeito do bloco j dentro da fonte N s ;

$(gd)_{is}$: efeito da interação de linhagens i com fonte de N s ;

e_{isj} : erro experimental médio.

As análises de variância conjunta foram realizadas considerando todos os experimentos (combinações de local/época/ano/fonte de N). Foi utilizado o modelo matemático:

$$Y_{isjq} = m + g_i + d_s + a_q + b_{(q)j} + (ga)_{iq} + (gd)_{is} + (da)_{sq} + (gda)_{isq} + e_{isj}$$

Em que:

Y_{isjq} : observação do genótipo i sob fonte de N s no bloco j e ambiente q ;

m : média;

g_i : efeito da linhagem i ;

d_s : efeito da fonte de N s

a_q : efeito do ambiente q ;

$b_{(q)j}$: efeito do bloco j dentro do ambiente q ;

$(ga)_{iq}$: efeito da interação de linhagens i e ambiente q ;

$(gd)_{is}$: efeito da interação de linhagens i e fonte de N s ;

$(da)_{sq}$: efeito da interação fonte de N s e ambiente q ;

$(gda)_{isq}$: efeito da interação tripla entre genótipos i , fonte de N s e ambiente q ;

e_{isj} : erro experimental médio. Os efeitos de genótipos, ambiente e fonte de N foram considerados fixos.

Foram estabelecidas as relações entre a produtividade sob inoculação e sob adubação nitrogenada (RPIN), em porcentagem. Este índice foi calculado a partir das médias obtidas em cada experimento por meio da expressão (Dias et al., 2020a):

$$RPIN = \left(\frac{PG_{inoc}}{PG_{nitro}} \right) \times 100$$

em que:

PG_{inoc} : produtividade de grãos em ambientes inoculados;

PG_{nitro} : produtividade de grãos em ambientes nitrogenados.

Foram estimados o coeficiente de variação experimental (CV) e a acurácia seletiva (AS), para verificação da precisão experimental. As médias foram agrupadas pelo teste de Scott-Knott (Scott; Knott, 1974), a 5% de probabilidade. Foram obtidas as correlações de Spearman para todos os caracteres, utilizando-se as médias com inoculação e com adubação mineral, em cada ambiente. Adicionalmente, para a produtividade de grãos, dos 19 genótipos avaliados em cada ambiente foram selecionados os cinco superiores em cada fonte de N. Em seguida, determinou-se a coincidência entre os genótipos classificadas como superiores nas duas fontes, expressa em porcentagem, a fim de avaliar se a seleção das linhagens mais produtivas seria consistente entre a fertilização mineral e a FBN (Dias et al., 2020; 2024).

O método WAAS (*Weighted Average of Absolute Score*) foi utilizado para estimar a estabilidade dos genótipos em ensaios multiambientes. Esse método combina a capacidade preditiva dos modelos lineares fixos, que permite tratar a interação genótipo x ambiente (GEI) como efeito aleatório, com a interpretação gráfica característica do modelo AMMI (*Additive Main Effects and Multiplicative Interaction*). No cálculo do WAAS, os scores absolutos dos

componentes principais a partir da decomposição da matriz de interação GEI são ponderados pela variância explicada de cada componente. Dessa forma, obtém-se uma medida única e robusta de estabilidade: quanto menor o valor de WAAS, mais estável é o genótipo avaliado. Foi utilizado o seguinte modelo:

$$WAAS_i = \frac{\sum_{k=1}^p |IPCA_{ik} \times EP_k|}{\sum_{k=1}^p EP_k}$$

Onde $WAAS_i$ é a média ponderada dos escores absolutos do genótipo i ; $IPCA_{ik}$ é o escore do genótipo i no k -ésimo IPCA; e EP_k é a variância explicada pelo k IPCA para $k = 1, 2, \dots, p$, sendo $p = \min(g - 1; e - 1)$.

O índice de superioridade WAASY (*Weighted Average of Absolute Scores and YIELD/response*) foi estimado com o objetivo de selecionar genótipos que combinem alto desempenho e estabilidade de forma conjunta (Olivoto et al., 2019). O WAASY pode ser entendido como uma extensão do WAAS, em que se atribui pesos distintos à produtividade média (ou outra variável de interesse) e à estabilidade (valores de WAAS). O WAASY é representado por valores que vão de 0 a 100, sendo que valores mais próximos de 100 indicam genótipos superiores.

$$WAASY_i = \frac{(rG_i \times \theta_Y) + (rW_i \times \theta_S)}{\theta_Y + \theta_S}$$

Em que: $WAASY_i$ é o índice de superioridade para o genótipo i que pondera entre desempenho e estabilidade; rG_i e rW_i são os valores escalonados (0-100) para produtividade e WAAS, respectivamente; θ_Y e θ_S são os pesos para produtividade e WAAS, respectivamente (Olivoto; Sari, 2021).

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software Genes (Cruz et al., 2013), e software R (R Core Team, 2025) com auxílio do pacote metan (Olivoto et al., 2019).

3.3 EXPERIMENTOS DE CASA DE VEGETAÇÃO

3.3.1 Delineamento experimental e caracteres avaliados

Paralelamente aos experimentos de campo foram realizados dois experimentos de casa de vegetação, implantados em junho e outubro de 2024. Foram avaliadas as 15 linhagens e quatro testemunhas Pérola, BRS FP403, BRS Esplendor e Ouro Negro com e sem inoculação. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso com quatro repetições. As unidades experimentais foram compostas por vasos plásticos de 3,8 L, preenchidos com uma mistura de 2:1 de solo e areia. Foram semeadas cinco sementes por vaso e sete dias após a emergência das plantas foi efetuado o desbaste, deixando duas plantas por vaso. A inoculação das plantas foi realizada aos sete dias após a emergência, com auxílio de uma pipeta, utilizando 1 ml planta⁻¹ do inoculante líquido pelo Laboratório de Biologia do Solo da Embrapa Arroz e Feijão, cujas características foram descritas no item anterior. Uma vez por semana, durante o período de condução do experimento, foi aplicada solução nutritiva de Hoagland (Hothem et al., 2003), isenta de nitrogênio.

As avaliações foram realizadas quando pelo menos uma planta da parcela estava com pelo menos uma flor aberta (estágio R6). Os caracteres avaliados foram: massa seca total, número de nódulos, área nodular, massa seca de nódulos e massa específica de nódulos.

A massa seca da parte aérea foi obtida retirando-se a parte aérea das duas plantas de cada parcela com auxílio de um alicate de poda a 1 cm do solo, e acondicionando-a em saco de papel devidamente identificado. Os sacos de papel foram levados para estufa de circulação forçada de ar por 72 horas a 65°C. Após este período, as amostras foram pesadas para determinação da massa.

Após a separação da parte aérea, as raízes foram cuidadosamente retiradas dos vasos, separadas do substrato e lavadas sobre uma peneira em água corrente. Em seguida, os nódulos presentes nas raízes foram destacados e dispostos sobre um fundo azul liso para obtenção das imagens, que foram adquiridas utilizando um smartphone com câmera de relação focal de f/1.5 e resolução de 12 megapixels. O pacote 'pliman' do *software* R (Olivoto, 2022), foi utilizado para compressão e processamento das imagens e obtenção do número de nódulos (NN- unidade planta⁻¹) e área nodular (AN – mm² nódulo¹).

As raízes e os nódulos foram colocados em saquinhos de papel e secos em estufa de circulação forçada de ar, onde permaneceram por 36 horas a 72°C, sendo, após esse período,

pesados para determinação da massa seca da raiz e massa seca de nódulo (MSN – mg planta⁻¹). A massa seca total da planta (MST – g planta⁻¹) foi determinada pela soma da massa seca da parte aérea e da massa seca da raiz. A massa específica de nódulos (MEN – mg nódulo⁻¹) foi obtida dividindo-se a massa de nódulos secos pelo número de nódulos.

3.3.2 Análises estatísticas

Foram realizadas análises de variância individuais para todos os caracteres, nos dois experimentos, de acordo com o delineamento de blocos completos casualizados, conforme o modelo:

$$Y_{ij} = \mu + t_i + b_j + e_{ij}$$

Em que

Y_{ij} : é o valor observado na parcela que recebeu o tratamento i no bloco j ;

μ : é a média geral do caráter;

t_i : é o efeito fixo do tratamento i ;

b_j : é o efeito aleatório do bloco j ;

e_{ij} : é o erro experimental associado à parcela ij , em que $\sim N(0, \sigma^2)$.

As análises de variância conjuntas foram realizadas conforme o modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + t_i + a_k + b_{j(k)} + (ta)_{ik} + e_{ijk}$$

Em que:

Y_{ijk} : é o valor observado na parcela que recebeu o tratamento i , no bloco j e no ambiente k ;

μ : é a média geral (constante inerente a todas as observações);

t_i : é o efeito fixo do tratamento i ;

a_k : efeito fixo do ambiente k ;

$b_{j(k)}$: é o efeito aleatório do bloco j dentro do ambiente k ;

$(ta)_{ik}$: é o efeito da interação tratamentos x ambientes;

e_{ijk} : é o resíduo associado à parcela que recebeu o tratamento i , no bloco j , no ambiente k , sendo $e_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$.

Foram estimados o coeficiente de variação experimental (CV) e a acurácia seletiva (AS), para verificação da precisão experimental e as médias foram agrupadas pelo teste de Scott-Knott (Scott; Knott, 1974), a 5% de probabilidade. Foram estimados os coeficientes de correlação de Pearson entre os caracteres avaliados. As análises estatísticas foram realizadas com auxílio dos softwares Genes (Cruz, 2013) e R (R Core Team, 2025).

3.4 ÍNDICE DE SELEÇÃO E CORRELAÇÃO ENTRE CARACTERES

As médias ajustadas para cada genótipo (BLUEs) foram obtidas para os dados obtidos em campo e em casa de vegetação, utilizando a função ‘lm’ e do pacote ‘emmeans’ (Lenth et al., 2025) do software R (R Core Team., 2025). O índice MGIDI (*Multi-trait Genotype- Ideotipo Distance Index*) foi utilizado como critério de seleção multicares, permitindo a identificação de genótipos mais próximos de um ideótipo previamente definido (Olivoto e Nardino, 2021). O índice foi calculado considerando a média das linhagens para os caracteres avaliados em campo e em casa de vegetação em condições de FBN. Inicialmente, as variáveis foram reescaladas de modo que os valores desejáveis, conforme a direção de seleção de cada caráter, fossem padronizados em uma mesma direção de seleção (Klein et al., 2023). Em seguida, aplicou-se a análise fatorial para agrupar caracteres correlacionados em fatores latentes, reduzindo a dimensionalidade do conjunto de dados e minimizando redundâncias entre variáveis. A partir desses fatores, foi calculada a distância euclidiana entre cada genótipo e um ideótipo teórico, definido como aquele que apresenta valores ótimos para todos os caracteres avaliados, da seguinte forma:

$$MGIDI_i = \left[\sum_{j=1}^f (\gamma_{ij} - \gamma_j)^2 \right]^{0,5}$$

Em que:

$MGIDI_i$: corresponde ao *multi-trait genotype-ideotype distance index* para o i -ésimo genótipo;

γ_{ij} : representa o escore do i -ésimo genótipo no j -ésimo fator ($i = 1, 2, \dots, g$; $j = 1, 2, \dots, f$), sendo g e f o número de genótipos e de fatores, respectivamente;

γ_j : corresponde ao j -ésimo escore do ideótipo.

Assim, o genótipo que apresentar o menor valor de MGIDI será aquele mais próximo do ideótipo, indicando desempenho desejável para a maioria dos caracteres avaliados.

Os coeficientes de correlação de Pearson foram estimados para quantificar a intensidade e a direção das associações lineares entre os caracteres agronômicos, produtivos e fisiológicos avaliados, com base nas médias ajustadas dos genótipos, utilizando o pacote 'metan' (Olivoto e Lúcio, 2020).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 EXPERIMENTOS DE CAMPO

4.1.1 Produtividade de grãos

As estimativas dos coeficientes de variação para as análises de variância individuais variaram de 10,56% a 24,46% (Tabela 2). Esses valores se enquadram dentro do intervalo considerado adequado para experimentos em campo, uma vez que coeficientes de variação inferiores a 25% indicam boa precisão experimental e maior confiabilidade dos resultados (Resende e Duarte, 2007). De forma complementar, as estimativas de acurácia seletiva foram superiores a 70% em 93% dos experimentos conduzidos, reforçando que as condições experimentais permitiram elevada capacidade de distinção entre os genótipos avaliados, o que é essencial para a seleção eficiente de materiais superiores.

Houve efeito significativo entre as linhagens na maioria dos ambientes avaliados, confirmando a existência de variabilidade genética dentro da população estudada. Essa variabilidade é fundamental em programas de melhoramento, pois possibilita identificar linhagens com desempenho superior. As únicas exceções ocorreram em Brasília-BR no inverno de 2023 sob adubação nitrogenada mineral e em Santo Antônio de Goiás-GO no inverno de 2024 sob FBN, nos quais não foi detectada diferença estatística entre as linhagens. Esse comportamento pode estar associado à maior homogeneidade das respostas nesses ambientes ou a condições ambientais que reduziram a expressão do potencial genético (Pereira et al., 2015).

O contraste linhagens versus testemunhas (L vs T) não foi significativo para a maioria dos experimentos, sugerindo que as linhagens desenvolvidas sob sistemas de FBN alcançaram padrões agronômicos equivalentes aos materiais já recomendados comercialmente. Esse resultado é particularmente relevante, pois reforça que a seleção sob sistemas com inoculação e baixa disponibilidade de N mineral não compromete o desempenho agronômico

das linhagens quando comparadas a cultivares comerciais, independentemente da fonte de N utilizada na avaliação. Resultados semelhantes para produtividade de grãos foram reportados por Costa et al. (2025), que avaliaram um conjunto mais amplo de linhagens oriundas da mesma população.

Houve significância para a fonte de nitrogênio (FN) em quatro dos sete ambientes avaliados, demonstrando que a produtividade de grãos diferiu entre duas fontes de N (Tabela 2). Em relação às médias, observou-se que em dois dos sete ambientes as linhagens apresentaram valores estatisticamente iguais ou superiores sob FBN em comparação ao uso de N mineral (Tabela 2 e Apêndice A). Esses resultados evidenciam que tais ambientes foram mais favoráveis para expressão da FBN. Em contraste, nos estudos de Dias et al. (2020) e Pereira et al. (2015) foram relatadas médias mais altas sob condições de N mineral em todos os ambientes avaliados. Essa diferença de resultados pode ser atribuída ao fato de que as linhagens avaliadas no presente trabalho foram desenvolvidas sob condições exclusivas de FBN, o que lhes confere uma vantagem adaptativa nesse tipo de ambiente.

Para a interação entre linhagens e fontes de nitrogênio (L x FN), quatro ambientes não apresentaram significância estatística. Isso indica que, de forma geral, as linhagens mantiveram comportamento estável frente às duas fontes de nitrogênio (adubação mineral e inoculação com rizóbio), demonstrando capacidade de ajuste fisiológico e boa adaptação aos sistemas de produção com menor dependência de nitrogênio mineral. A interação L vs T x FN não foi significativa na maior parte dos ambientes, reforçando que tanto as linhagens quanto as testemunhas responderam de maneira semelhante às diferentes fontes de N.

De forma geral, os resultados demonstram boa qualidade experimental, elevada capacidade de seleção e ampla estabilidade das linhagens em diferentes condições de suprimento de nitrogênio. Esses aspectos fortalecem o potencial das linhagens desenvolvidas para sistemas exclusivos de FBN, tanto do ponto de vista agrônomico quanto da sustentabilidade no uso de insumos nitrogenados.

Tabela 2. Resumo das análises de variância individuais para produtividade de grãos (kg ha⁻¹) de 15 linhagens e quatro testemunhas de feijão-comum preto, conduzidos em ambientes com inoculação com rizóbio (FBN) e adubação nitrogenada (N mineral) nos estados de Goiás, Paraná e Brasília, em três épocas de semeadura, em 2023 e 2024.

Local/época/ano ¹	Fonte N ²	P-valor							Médias						
		L ³	T ⁴	L vs T ⁵	FN ⁶	L x FN ⁷	T x FN ⁸	L vs T x FN ⁹	L ¹⁰	T ¹¹	Geral ¹²	CV ¹³	AS ¹⁴	r ¹⁵	IC% ¹⁶
SAT/GO/Inverno/2023	FBN	0,014	0,000	0,000	0,000	0,001	0,088	0,154	1912	1672	1798	19,64	0,89	0,24 ^{ns}	33
	N mineral	0,000	0,000	0,102					2340	2576	2284	21,08	0,91		
BSB/DF/Inverno/2023	FBN	0,000	0,000	0,121	0,000	0,019	0,582	0,529	1230	1361	1206	17,25	0,93	0,21 ^{ns}	33
	N mineral	0,254	0,009	0,156					2382	2414	2338	19,13	0,68		
PG/PR/Águas/2023	FBN	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,333	0,508	2770	2957	2696	10,56	0,96	0,23 ^{ns}	50
	N mineral	0,020	0,000	0,072					2515	2697	2464	16,25	0,88		
SAT/GO/Inverno/2024	FBN	0,317	0,000	0,000	0,235	0,074	0,081	0,041	3336	3240	3190	16,48	0,88	0,37 ^{ns}	33
	N mineral	0,002	0,000	0,172					3353	3140	3308	14,26	0,86		
SAT/GO/Águas/2024	FBN	0,032	0,000	0,000	0,205	0,324	0,172	0,317	2645	2763	2555	11,72	0,95	0,49*	67
	N mineral	0,023	0,000	0,000					2601	2435	2481	12,65	0,92		
PG/PR/Seca/2024	FBN	0,016	0,000	0,417	0,171	0,316	0,006	0,857	1762	1901	1748	13,70	0,89	0,64**	50
	N mineral	0,000	0,000	0,251					1825	2094	1807	12,08	0,94		
PG/PR/Águas/2024	FBN	0,000	0,000	0,033	0,000	0,423	0,336	0,087	1075	1521	1116	24,46	0,94	0,84**	67
	N mineral	0,000	0,000	0,885					1287	1514	1284	19,90	0,96		
Geral		-	-	-					2217	2306	2162	-	-	0,66*	50

¹SAT: Santo Antônio de Goiás; PG: Ponta Grossa; BSB: Brasília; ²FBN: inoculação com rizóbio, N mineral: adubação mineral nitrogenada; ³P-valor associado à fonte de variação linhagens (L); ⁴P-valor associado à fonte de variação testemunhas (T); ⁵P-valor associado à fonte de variação Linhagens vs Testemunhas; ⁶P-valor associado à fonte de variação fonte de N; ⁷P-valor associado a fonte de variação interação linhagens por fonte de N; ⁸P-valor associado à fonte de variação interação Testemunhas por fonte de N; ⁹P-valor associado à fonte de variação interação linhagens vs testemunhas por fonte de N; ¹⁰Média de linhagens; ¹¹Média de testemunhas (sem NORH54); ¹²Média geral; ¹³Coeficiente de variação (%); ¹⁴Acurácia seletiva; ¹⁵Correlação de Spearman: ^{ns}não significativo (p>0,05), * significativo (p≤ 0,05) e **altamente significativo (p≤0,01) pelo teste t de Student; ¹⁶Índice de coincidência (%) de seleção das seis melhores linhagens.

Para a análise de variância conjunta, o coeficiente de variação (CV) foi de 20,41% (Tabela 3), indicando boa precisão experimental. A acurácia seletiva (AS), estatística de precisão que independe da média, foi muito alta (0,99), o que evidencia a alta informatividade dos experimentos e a confiabilidade na seleção (Resende e Duarte, 2007).

Tabela 3. Resumo da análise de variância conjunta para produtividade de grãos (kg ha⁻¹) de quinze linhagens e quatro testemunhas de feijão-comum preto em 14 experimentos nos estados de Goiás, Paraná e Brasília, em três épocas de semeadura, em 2023 e 2024, sob duas fontes de nitrogênio (fixação biológica de nitrogênio e adubação mineral nitrogenada).

Fontes de variação	GL ¹	QM ²	P-valor
Genótipo (G)	18	47201660	0,000
Linhagem (L)	14	380577	0,000
Testemunhas (T)	3	8639027	0,000
L vs T	1	8615534	0,000
Ambientes (A)	6	51733339	0,000
Fontes de N (FN)	1	11170056	0,000
G x A	108	588917	0,000
L x A	84	580258	0,000
T x A	18	526316	0,000
L vs T x A	6	897937	0,000
G x FN	18	339635	0,000
L x FN	14	407386	0,000
T x FN	3	102947	0,492
L vs T x FN	1	101183	0,377
A x FN	6	5836766	0,000
G x A x FN	108	252315	0,000
L x A x FN	84	247390	0,000
T x A x FN	18	262067	0,007
L vs T x A x FN	6	292014	0,033
Resíduo	499	127982	-
Média geral	2.163		
CV ³	20,41		
AS ⁴	0,99		

¹Graus de liberdade; ²Quadrado médio; ³Coeficiente de variação (%); ⁴Acuracia seletiva conjunta.

O efeito das fontes de variação principais (genótipos, linhagens, testemunhas, linhagens versus testemunhas, ambientes e fontes de N) foram altamente significativos (Tabela 3). A variabilidade entre genótipos confirma o potencial de seleção das linhagens mais

produtivas (Costa et al., 2025a). O efeito significativo do fator ambiente indica que variáveis como o tipo de solo, a disponibilidade de nutrientes, a temperatura e a precipitação influenciaram de forma expressiva a produtividade das plantas.

De acordo com Pereira et al. (2016), variações edafoclimáticas entre locais e safras podem modificar o desempenho dos genótipos, resultando em diferenças expressivas no rendimento de grãos. Esse resultado sugere que as condições climáticas e as características do solo contribuíram para a variabilidade observada entre os ambientes avaliados. A significância para ambientes era esperada, considerando as diferentes épocas de semeadura, os anos de avaliação e a variação geográfica entre os municípios, com latitudes variando de 15°46 a 25°05 e altitudes entre 823 e 1,171 m (Tabela 1), o que reforça a influência das condições ambientais na expressão do potencial produtivo dos genótipos.

A significância para fontes de N indica variação na produtividade de grãos entre as duas fontes, com média de 2.267 kg ha⁻¹ sob adubação com N mineral e 2.045 kg ha⁻¹ sob inoculação com rizóbio (Tabela 4). Apesar da diferença observada, a produtividade sob FBN manteve-se elevada, correspondendo a aproximadamente 90% da média obtida com adubação mineral, além de apresentar valores absolutos superiores aos relatados em outros estudos (Pereira et al., 2015; Farid et al., 2017). Resultados semelhantes foram reportados por Pereira et al. (2015), Dias et al. (2020) e Reinprecht et al. (2020), que observaram produtividades sob FBN equivalentes a cerca de 85%, 93% e 91%, respectivamente, daquelas obtidas com adubação nitrogenada mineral, em avaliações de cultivares e linhagens elite.

Além de manter os níveis produtivos próximos aos obtidos com adubação nitrogenada, a utilização da inoculação se destaca pelo seu baixo custo. O fertilizante mineral utilizado, a ureia, apresenta 45% de N em sua composição, e para a dose utilizada (80 kg de N ha⁻¹) foram aplicados 178 kg de ureia por hectare. O preço da ureia no Brasil é de R\$ 2.133,75 por tonelada, sendo gastos R\$ 379,14 por hectare em fertilizante mineral nitrogenado. Para inocular esse mesmo hectare foram gastos R\$ 20,00. Isso demonstra uma economia significativa em fertilizantes nitrogenados, o que sugere que a FBN pode aumentar a rentabilidade e ao mesmo tempo, reduzir a dependência do nitrogênio mineral, beneficiando tanto a economia quanto o meio ambiente (Soares et al., 2016).

A interação de ambientes com fontes de N (A x FN) foi altamente significativa (Tabela 3), indicando que dependendo do ambiente em que o experimento foi conduzido, as

respostas variaram em função do uso de N mineral ou inoculação. O resultado evidencia que o desempenho da FBN depende das condições ambientais em que o experimento foi conduzido. Fatores ambientais como altas temperaturas, déficit hídrico e acidez do solo podem comprometer a formação e funcionamento dos nódulos, afetando principalmente a bactéria. As plantas supridas com N mineral tendem a ser menos sensíveis aos estresses ambientais, o que pode explicar as diferenças observadas (Hungria e Vargas, 2000).

A interação linhagens por fonte de N (L x FN) foi significativa (Tabela 3). Esse resultado demonstra que as linhagens apresentam respostas diferenciadas às fontes de N avaliadas, evidenciando que algumas linhagens foram mais adaptáveis à inoculação com rizóbios, enquanto outras mostraram melhor desempenho sob adubação mineral nitrogenada. De igual forma, em diversos estudos observou-se que as linhagens costumam igualar ou até mesmo superar os rendimentos obtidos com fertilizantes químicos, o que evidencia o potencial da FBN como uma alternativa sustentável (Negri e Carrión, 2016; Pacheco et al., 2014).

Esses resultados são reforçados pelas estimativas de correlação obtidas entre as médias das linhagens nos dois sistemas (Tabela 2). Em 57% dos ambientes avaliados, a correlação foi não significativa indicando que houve alterações no ranqueamento dos genótipos nas fontes de N avaliadas, embora a correlação geral ($r=66^*$) foi intermediária e significativa, valor que, segundo Schober e Schwarte (2018), enquadra-se na faixa de correlações moderadas, refletindo associação entre os dois sistemas de fornecimento de nitrogênio. Para o índice de coincidência (IC%), verificou-se que, em todos os ambientes avaliados, entre duas e três linhagens, em média, estiveram entre as seis melhores nas duas fontes de nitrogênio. Dentre elas, destacaram-se as linhagens CNFP 21660, CNFP 21675, que se apresentaram entre as seis melhores linhagens em dois ambientes, e a CNFP 21685, que manteve comportamento consistente em três ambientes, considerando ambas as fontes de nitrogênio.

Observa-se que nove das 15 linhagens avaliadas apresentaram médias de produtividade de grãos estatisticamente iguais nas duas fontes de nitrogênio (Tabela 4). Isso evidencia a importância da fonte de N utilizada e sua influência sobre o comportamento dos genótipos ao longo dos anos de seleção. As linhagens foram conduzidas pelo método *bulk*, utilizando a inoculação com rizóbio como fonte de N, o que pode ter contribuído para selecionar os genótipos mais produtivos e competitivos sob FBN (Costa et al., 2025b), reduzindo as diferenças encontradas na comparação entre as médias nas duas fontes de N.

Em estudos desenvolvidos por Pereira et al. (2015) e Dias et al. (2020) avaliando cultivares e linhagens elite foram encontrados poucos genótipos com desempenho semelhante nas duas fontes de N. De acordo com Pereira et al. (2015), para alcançar maior produtividade da cultura sob FBN, o processo de desenvolvimento de linhagens deve ser conduzido, preferencialmente, utilizando essa fonte de nitrogênio, pois isso proporciona condições mais favoráveis para a expressão do potencial genético associado à eficiência simbiótica, resultando na obtenção de genótipos mais produtivos.

Para a condição de FBN, onze linhagens, juntamente com três testemunhas (BRS FP403, BRS FP417 e BRS Esplendor) apresentaram produtividades altas e estatisticamente semelhantes pelo teste de médias. No entanto, apesar do desempenho satisfatório das testemunhas, as médias obtidas em condições de FBN foram inferiores as relatadas em estudos conduzidos sob adubação mineral nitrogenada (Torres et al., 2021; Souza et al., 2019; Aguiar et al., 2023).

Ao avaliar a relação de produtividade em ambientes inoculados e com adubação nitrogenada (RPIN), verifica-se que quanto mais próximos de 100% maior será a semelhança de produtividade nas duas fontes de N. Trata-se de um índice comparativo, no qual valores iguais a 100% indicam desempenho equivalente entre os sistemas de fornecimento de nitrogênio, valores inferiores a 100% demonstram maior produtividade sob inoculação, enquanto valores inferiores indicam maior resposta à adubação nitrogenada. Assim, o RPIN não possui valor absoluto de referência, sendo sua interpretação baseada na comparação entre genótipos e em relação ao padrão de 100%.

Na Tabela 4, observa-se que as estimativas para o índice RPIN variam de 76,9% (CNFP 21617) a 102,1% (CNFP 21622) e com menor porcentagem para a NORH54 (66,8%), testemunha não nodulante. Destacaram-se as linhagens CNFP 21622 e CNFP 21642 (acima de 100%), que juntamente com outras sete linhagens (CNFP 21629, CNFP 21630, CNFP 21640, CNFP 21661, CNFP 21673, CNFP 21675 e CNFP 21688) apresentam valores superiores a 90% de RPIN, sendo recomendadas para ambientes com FBN.

A interação de genótipos por ambientes (G x A) foi altamente significativa (Tabela 3), reforçando a necessidade de analisar a estabilidade das linhagens a fim de selecionar as mais eficientes em ambientes de FBN. Os índices WAAS e WAASY considerando os três cenários

(geral, inoculado e com adubação nitrogenada) para cada linhagem estão apresentados na Tabela 4.

Os gráficos bidimensionais são ferramentas utilizadas na análise WAAS para interpretação conjunta da produtividade e estabilidade, distribuindo genótipos e ambientes em quatro quadrantes. No quadrante I, podem ser encontrados genótipos instáveis e ambientes com alta capacidade de discriminação, mas com produtividade abaixo da média geral. No quadrante II estão incluídas as linhagens instáveis, embora com produtividade acima da média geral. As linhagens dentro do quadrante III tem baixa produtividade, mas podem ser consideradas estáveis devido aos valores mais baixos de WAAS. As linhagens dentro do quadrante IV são altamente produtivas e estáveis (Olivoto e Sari, 2021).

Tabela 4. Médias, índice de estabilidade WAAS (*Weighted Average of Absolute Scores*) e índice de superioridade WAASY (*Weighted Average of the stability and mean performance*) para produtividade de grãos (kg ha⁻¹) e relação entre a produtividade com inoculação e com adubação nitrogenada mineral (RPIN-%) de quinze linhagens e quatro testemunhas de feijão-comum preto, avaliadas sob adubação nitrogenada mineral (N mineral) e inoculação com rizóbio (FBN), em 14 experimentos nos estados de Goiás, Paraná e Brasília, em três épocas de semeadura, em 2023 e 2024.

Genótipo	Geral			FBN			N mineral			RPIN
	Média	WAAS	WAASY	Média	WAAS	WAASY	Média	WAAS	WASSY	
CNFP21617	2308 a	16,68	64,74	1965 Bb	11,25	68,12	2650 Aa	14,28	74,28	74,2
CNFP21619	2120 b	5,70	77,14	1865 Bb	5,72	75,85	2375 Aa	8,54	78,80	78,5
CNFP21622	2241 b	10,23	74,04	2264 Aa	8,11	85,70	2218 Ab	9,43	70,89	102,1
CNFP21629	2227 b	13,98	66,45	2145 Aa	9,46	78,49	2309 Ab	8,82	75,68	92,9
CNFP21630	2173 b	12,53	67,15	2150 Aa	9,16	79,28	2196 Ab	7,97	73,59	97,9
CNFP21640	2040 b	1,67	81,98	1892 Ab	1,77	85,02	2188 Ab	4,64	81,30	86,5
CNFP21642	2210 b	21,64	52,33	2237 Aa	8,30	84,28	2182 Ab	20,58	42,86	102,5
CNFP21649	2245 b	14,77	65,66	2092 Ba	10,67	74,05	2397 Aa	10,21	75,58	87,3
CNFP21651	2074 b	9,60	68,96	1916 Bb	6,29	76,55	2233 Ab	11,36	66,81	85,8
CNFP21660	2339 a	3,14	91,06	2201 Ba	5,55	88,64	2476 Aa	7,17	85,78	88,9
CNFP21661	2148 b	7,74	75,22	2090 Aa	4,49	86,71	2206 Ab	8,42	72,87	94,7
CNFP21673	2231 b	8,93	76,14	2150 Aa	6,08	85,68	2312 Ab	7,59	78,76	93,0
CNFP21675	2330 a	15,20	68,02	2236 Aa	11,86	76,91	2424 Aa	11,25	74,07	92,2
CNFP21685	2364 a	4,57	89,32	2210 Ba	4,21	91,73	2518 Aa	7,15	87,36	87,8
CNFP21688	2200 b	4,25	83,76	2149 Aa	4,02	89,90	2250 Ab	3,90	85,34	95,5
BRS Esplendor	2237 b	0,40	92,41	2057 Ba	6,82	80,68	2418 Aa	5,74	87,05	85,1
BRS FP403	2325 a	5,72	85,68	2255 Aa	5,59	90,56	2394 Aa	6,80	83,66	94,2
BRS FP417	2439 a	5,43	90,53	2297 Ba	6,04	91,18	2581 Aa	6,11	92,15	89,0
NORH54	845 c	18,93	5,11	677 Bc	21,13	0,00	1013 Ac	7,20	32,09	66,8
Geral (com NORH54)	2163	–	–	2045 B	–	–	2267 A	–	–	89,2
Geral (sem NORH54)	2236			2121 B			2352 A			90,4

Médias seguidas por mesmas letras minúsculas na coluna e maiúsculas na linha não diferem estatisticamente entre si (Scott-Knott, $\alpha=5\%$).

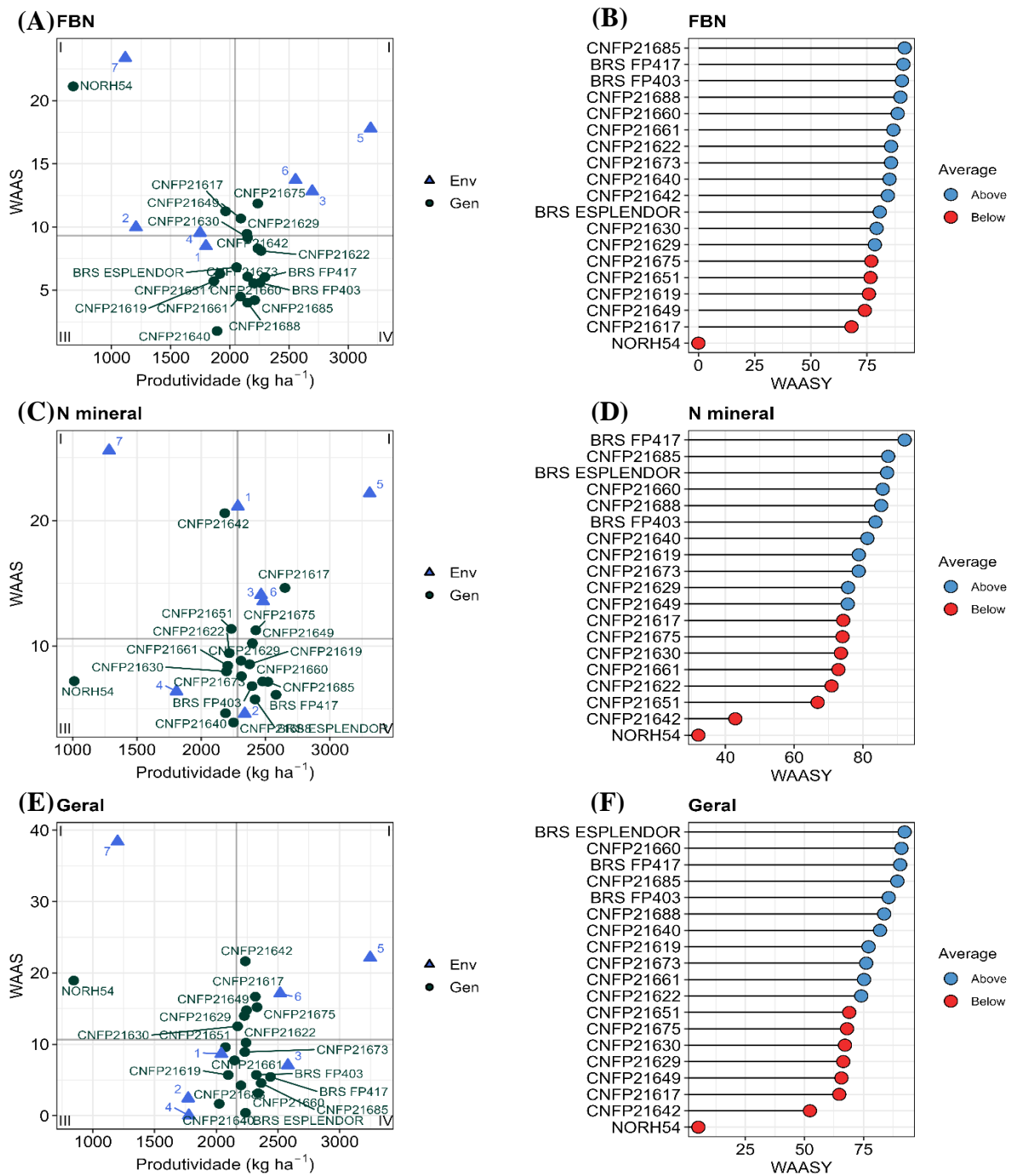


Figura 1. Biplot da produtividade de grãos (kg ha^{-1}) vs. WAAS (*Weighted Average of Absolute Scores*) e valores estimados de WAASY (*Weighted Average of the stability and mean performance*) de 19 genótipos de feijão comum, considerando ambientes com inoculação com rizóbio (A e B), adubação nitrogenada mineral (C e D) e geral (E e F). Ambientes: 1- Santo Antônio de Goiás-GO, inverno de 2023; 2- Brasília-DF, inverno de 2023; 3- Ponta Grossa-PR, águas de 2023; 4- Ponta Grossa-PR, seca de 2024; 5- Santo Antônio de Goiás-GO, inverno de 2024; 6- Santo Antônio de Goiás-GO, águas de 2024; 7- Ponta Grossa-PR, águas de 2024.

No biplot considerando os ambientes de FBN (Figura 1A), o quadrante I agrupou a testemunha NORH54, caracterizada por baixa estabilidade e produtividade de grãos, comportamento esperado em função de sua incapacidade de nodulação e reduzido potencial produtivo. Nesse mesmo quadrante posicionou-se e a linhagem CNFP 21617, que demonstrou ser pouco responsiva à inoculação. Em contraste, nos ambientes com adubação mineral nitrogenada, essa linhagem passou a se posicionar no quadrante II (Figura 1C), indicando alteração de seu desempenho produtivo em função da fonte de nitrogênio. Os ambientes localizados no quadrante I foram Brasília-DF, safra de inverno de 2023 e Ponta Grossa-PR, nas safras da seca e das águas de 2024 (Figura 1A). Esses ambientes apresentaram alta capacidade discriminatória, indicando maior eficiência na diferenciação do desempenho dos genótipos avaliados.

Os ambientes localizados no quadrante II caracterizam-se por serem altamente discriminantes e apresentarem elevado potencial produtivo, destacando-se Ponta Grossa-PR, na safra das águas de 2023 e Santo Antônio de Goiás-GO, nas safras de inverno e das águas de 2024. Nesse quadrante também se agrupam genótipos com alto potencial de rendimento, porém com baixa estabilidade, o que indica adaptação específica a esses ambientes. As linhagens CNFP 21675, CNFP 21649 e CNFP 21629 se posicionaram nesse quadrante para os ambientes de FBN (Figura 1A), sugerindo elevado potencial produtivo nessas condições, porém com maior sensibilidade às variações ambientais. Em N mineral (Figura 1C), CNFP 21629 e CNFP 21649 apresentaram desempenho superior e maior estabilidade (quadrante IV), enquanto CNFP 21675 permaneceu instável, apesar do alto rendimento (quadrante II).

Por outro lado, os genótipos do quadrante III apresentam alta estabilidade, mas seu rendimento é baixo em todos os ambientes. Nesse quadrante alocaram-se as linhagens CNFP 21619, CNFP 21651 e CNFP 21640, sendo esta última a que apresentou maior estabilidade, apesar da produtividade de grãos inferior à média (Figura 1A). Esses genótipos podem ser úteis em programas de melhoramento com fontes de genes associados à estabilidade em condições de FBN. O ambiente Santo Antônio de Goiás-GO, safra do inverno de 2023 também se posicionou nesse quadrante, evidenciando comportamento mais estável e menor contribuição para a variação da produtividade de grãos, sendo, inclusive, o único ambiente alocado nessa região do Biplot.

No quadrante IV encontram-se os genótipos ideais, pois combinam alto rendimento com alta estabilidade. Para os ambientes de FBN, destacaram-se nesse grupo sete linhagens (CNFP 21622, CNFP 21642, CNFP 21660, CNFP 21661, CNFP 21673, CNFP 21685 e CNFP 21688), além das testemunhas BRS Esplendor, BRS FP403 e BRS FP417 (Figura 1A). A presença de um número expressivo de linhagens nesse grupo evidencia a eficiência do processo de desenvolvimento e seleção desses genótipos especificamente sob condições de FBN, indicando que é possível obter materiais simultaneamente produtivos e estáveis mesmo em sistemas com menor disponibilidade de nitrogênio mineral. Além disso, a manutenção das linhagens CNFP 21660, CNFP 21673, CNFP 21685 no quadrante IV no ambiente com N mineral (Figura 1C) demonstra ampla adaptabilidade e consistência de desempenho frente a diferentes fontes de nitrogênio. Esses resultados reforçam a recomendação dessas linhagens tanto para sistemas dependentes de FBN quanto para aqueles como uso de fertilizantes nitrogenado, com a ressalva de que, em ambientes de FBN, observa-se maior vantagem em termos de custo-benefício e sustentabilidade do sistema produtivo.

Nenhum ambiente se posicionou no quadrante IV para os ambientes de FBN (Figura 1A), indicando que não houve ambientes que combinassem alta estabilidade produtiva com desempenho médio superior. Esse resultado sugere que a estabilidade produtiva não foi uma característica marcante dos ambientes avaliados, evidenciando que a maioria apresentou variações significativas no desempenho dos genótipos, possivelmente em função das condições edafoclimáticas. Já para os ambientes com adubação mineral nitrogenada (Figura 1C) a presença do ambiente Brasília-DF, na safra de inverno de 2023, nesse mesmo quadrante é particularmente relevante, pois o caracteriza como um ambiente de alto rendimento e elevada representatividade sendo inclusive, o único ambiente a se posicionar no quadrante IV. Esse comportamento indica condições ambientais favoráveis para a discriminação de genótipos superiores e para a expressão do potencial produtivo aliado à estabilidade sob FBN.

Apesar de ainda serem escassos os estudos sobre a estabilidade produtiva do feijão-comum em condições de FBN, os trabalhos disponíveis na literatura corroboram os resultados observados. Farid et al. (2016), demonstraram que a interação entre genótipos e fonte de nitrogênio influencia fortemente a estabilidade do rendimento, indicando que estratégias de melhoria direcionadas ao desempenho sob FBN podem resultar em genótipos mais estáveis e produtivos em ambientes com baixa adubação nitrogenada.

Paralelamente, realizou-se uma análise biplot (Figura 1E), considerando conjuntamente as duas fontes de nitrogênio, com o propósito de identificar linhagens com ampla aptidão geral, associando bom desempenho produtivo e estabilidade nos diferentes manejos de N. No quadrante II estão localizadas as linhagens CNFP 21642, CNFP 21617, CNFP 21649, CNFP 21675 e CNFP 21629 (Figura 1E), que, apesar de apresentarem produtividade superior à média geral, caracterizam-se pela sua instabilidade de acordo com o índice WAAS. Os ambientes correspondentes a este quadrante mostram, no entanto, boa capacidade de discriminação entre os genótipos.

No quadrante III a maioria das linhagens posiciona-se próxima à linha divisória, com exceção da linhagem CNFP 21640, que se destacou por sua baixa produtividade, embora apresentando boa estabilidade (Figura 1E). De modo geral, este quadrante reúne linhagens estáveis, porém com produtividade abaixo da média geral, como CNFP 21651, CNFP 21661, CNFP21619 e CNFP 21640. Os ambientes alocados nesse quadrante, como Santo Antônio de Goiás-GO e Brasília-BR, safra de inverno de 2023 e Ponta Grossa-PR, safra da seca de 2024, caracterizam-se por baixa produtividade e reduzida capacidade de discriminação, refletindo menor eficiência na diferenciação do desempenho dos genótipos.

As linhagens que se destacaram no quadrante IV foram CNFP 21673, CNFP 21622, CNFP 21685, CNFP 21660 e CNFP 21688, caracterizando-se como as mais estáveis, uma vez que apresentaram menores valores de WAAS e produtividade de grãos superior à média geral (Figura 1E). Essas cinco linhagens demonstraram potencial para seleção tanto em ambientes conduzidos sob FBN quanto em ambientes com adubação mineral nitrogenada. Desempenho semelhante foi observado para as testemunhas BRS Esplendor, BRS FP417 e BRS FP403, que também se posicionaram no quadrante IV. Adicionalmente, nesse mesmo quadrante encontra-se o ambiente Ponta Grossa-PR, safra das águas de 2023, o qual combina elevado rendimento e alta estabilidade produtiva.

Independentemente das condições de manejo do nitrogênio, as testemunhas apresentaram elevada produtividade e estabilidade, evidenciando sua ampla capacidade de adaptação. Esses resultados são reforçados por trabalhos, como os de Dias et al. (2020b) e Aguiar et al. (2023), que destacam o desempenho superior dessas cultivares elites. Entre elas, as testemunhas BRS FP403 e BRS FP417 são consistentemente reconhecidas como cultivares de alto rendimento, tanto em sistemas convencionais quanto em condições exclusivas de FBN.

Essa estabilidade produtiva indica que essas cultivares apresentam ampla capacidade de adaptação e eficiência no uso dos recursos disponíveis, o que as torna referências importantes na avaliação de novas linhagens.

Estudos conduzidos por Dias et al. (2020) e Caetano et al. (2023) demonstraram a existência de linhagens de feijão-comum capazes de combinar alta produtividade e estabilidade de rendimento sob diferentes condições de manejo do nitrogênio, tanto em sistemas dependentes da FBN, quanto sob adubação mineral nitrogenada. Esses resultados evidenciam que apesar de a resposta dos genótipos à fonte de nitrogênio não ser uniforme, há variabilidade genética para a seleção de materiais com ampla adaptabilidade. Nesse contexto, a identificação de linhagens estáveis em ambos os sistemas de manejo reforça a viabilidade de estratégias de melhoramento voltados à obtenção de genótipos eficientes no uso do nitrogênio, contribuindo para sistemas de produção mais sustentáveis e com menor dependência de fertilizantes nitrogenados.

Apesar de sua reconhecida robustez, ainda são escassos os estudos que aplicam metodologias multivariadas avançadas, como o índice WAAS/WAASY na avaliação da estabilidade produtiva do feijão-comum, sobretudo em sistemas conduzidos sob FBN. Nesse contexto, a utilização do índice WAASY representa um avanço metodológico relevante, uma vez que permite atribuir pesos diferenciados à estabilidade e à produtividade de grãos na classificação das linhagens, possibilitando uma avaliação mais integrada e realista do desempenho genotípico (Ambrioso et al., 2024; Caetano et al., 2023). A precisão e a eficiência dessa abordagem têm sido demonstradas em diferentes culturas evidenciando sua superioridade em relação a métodos multivariados tradicionais (Rajput et al., 2021; Singh et al., 2025). Assim, a aplicação do índice WAASY em feijão-comum, especialmente sob condições de FBN, destaca-se como uma estratégia metodológica inovadora e promissora para a identificação de genótipos superiores.

Neste estudo, foram atribuídos pesos de 60% para produtividade e 40% para estabilidade, para a avaliação do índice de superioridade WAASY. No primeiro cenário, considera-se os ambientes inoculados (Figura 1B). O segundo cenário considera os ambientes com adubação mineral nitrogenada (Figura 1D) e o terceiro considera ambas as fontes de N (Figura 1F). Os marcadores azuis representam o índice de superioridade WAASY acima da média e representam um equilíbrio ideal entre desempenho e estabilidade, dados os pesos atribuídos. Os marcadores vermelhos são linhagens que ficaram abaixo da média para o índice.

No primeiro gráfico, considerando os experimentos sob o tratamento de inoculação (Figura 1B), destacaram-se as linhagens CNFP 21685, CNFP 21688, CNFP 21660 CNFP 21673, CNFP 21622 e CNFP 21661. Dentre as quatro primeiras, também foi observado desempenho superior em ambientes com adubação mineral nitrogenada (Figura 1D), o que evidencia elevado potencial produtivo e ampla adaptabilidade a diferentes condições de disponibilidade de nitrogênio. Essas linhagens posicionaram-se no mesmo agrupamento das testemunhas BRS FP417 e BRS FP403, as quais, ficaram entre as primeiras no ranking de estabilidade. Assim, tanto as linhagens quanto as testemunhas apresentaram elevada estabilidade e rendimento produtivo acima da média em ambas as condições de fontes de nitrogênio, indicando seu potencial de recomendação para ambientes inoculados e com adubação mineral.

Considerando todos os ambientes (inoculados e adubação nitrogenada) (Figura 1F), entre os maiores índices percentuais estão as testemunhas, uma vez que obtiveram melhor estabilidade e produtividade (Apêndice B). No entanto, também no ranking dos seis melhores encontram-se CNFP 21685, CNFP 21688, CNFP 21660 e CNFP 21661, que se destacaram em ambientes inoculados.

A combinação das análises de produtividade médias em condições de fixação biológica de nitrogênio com os índices de estabilidade WAAS e WAASY permitiu uma identificação mais precisa de linhagens superiores, conciliando desempenho produtivo e estabilidade fenotípica. De modo geral, as linhagens CNFP 21622, CNFP 21660, CNFP 21661 CNFP 21673, CNFP 21685, CNFP 21688 destacaram-se por apresentarem elevadas médias de produtividade em FBN associadas a baixos valores de WAAS e altos índices WAASY. Dessa forma, essas linhagens se consolidam como as mais promissoras e são indicadas para avanço nas etapas subsequentes do programa de melhoramento, especialmente para ensaios de valor de cultivo e uso (VCU), com elevado potencial de contribuição para sistemas produtivos mais eficientes e sustentáveis baseados na fixação biológica de nitrogênio.

4.1.2 Qualidade de grãos

A qualidade tecnológica dos grãos deve ser avaliada juntamente com o desempenho agrônômico, pois é determinante para a recomendação de novas cultivares e sua aceitação no mercado consumidor. Estudos conduzidos por Borges et al. (2019), com linhagens-elite de feijão preto demonstram que características como massa de grãos e qualidade comercial são fundamentais destacando genótipos com melhor desempenho tecnológico.

O desempenho produtivo dos genótipos está relacionado com características associadas à qualidade dos grãos, já que são essenciais para a aceitação de uma nova cultivar. Para isso é importante avaliar os caracteres associados à qualidade de grãos como a massa de 100 grãos (M100), avaliação visual de grãos (AVG) e rendimento de peneira (RP). Os coeficientes de variação da análise conjunta apresentaram valores aceitáveis para as variáveis M100 e RP, enquanto a variável AVG (48,8%), apresentou um valor elevado (Tabela 5). As acurácias seletivas (AS) mostraram-se altas, confirmando a precisão experimental e a capacidade de discriminação entre genótipos.

Os efeitos das fontes de variação genótipos, linhagens, testemunhas e ambientes foram altamente significativos para os caracteres de qualidade de grãos (Tabela 5), evidenciando variabilidade genética entre os genótipos e influência das condições ambientais. A fonte de N foi significativa para a massa de 100 grãos, com médias muito próximas entre os dois manejos, de 21,9 g sob FBN e 22,3 g sob adubação nitrogenada. Para o rendimento de peneira e avaliação visual de grãos não foi observado efeito da fonte de N, indicando que esses caracteres são pouco influenciados pelo manejo nitrogenado.

A ausência de interação significativa entre linhagens e fontes de nitrogênio (L x FN) (Tabela 5) para as variáveis de qualidade dos grãos indica que a expressão desses caracteres foi estável frente às diferentes fontes de N avaliadas, evidenciando predominância do controle sobre a influência do manejo nutricional.

Resultados semelhantes foram observados por Fageria et al. (2014), que relataram diferenças genotípicas na resposta ao nitrogênio, destacando que determinados caracteres são mais dependentes da constituição genética do que das condições de adubação. De modo complementar, Silva et al. (2015), ao estudar a interação genótipo por ambiente em feijão-comum, demonstraram que caracteres relacionados à qualidade do grão tendem a apresentar elevada herdabilidade e maior estabilidade em diferentes condições ambientais.

Por outro lado, a significância observada para a interação T x FN, possivelmente associada ao comportamento diferenciado da testemunha NORH54, sugere que materiais geneticamente contrastantes podem apresentar respostas específicas quanto à qualidade dos grãos em função da fonte de N. Esse comportamento indica que, embora a tendência geral seja de estabilidade, genótipos particulares podem reagir de maneira distinta conforme sua constituição genética.

Nesse contexto, Ketema e Geleta (2022) reportaram herdabilidade em sentido amplo superior a 60% para massa de 100 grãos. Da mesma forma, Cavalheiro et al. (2023) observaram herdabilidades de 81% para massa de 100 grãos e 61% para avaliação visual de grãos, enquanto Costa et al. (2024b) encontraram valores de herdabilidade de 94% e 50% para essas mesmas variáveis. Esses achados reforçam a elevada contribuição genética para a qualidade dos grãos e sustentam a resposta consistente das linhagens às diferentes fontes de nitrogênio observada no presente estudo.

A correlação de Spearman (r) entre as médias dos genótipos nos dois sistemas para a massa de 100 grãos (M100), avaliação visual de grãos (AVG) e rendimento de peneira (RP) corroborou os resultados da análise de variância conjunta, uma vez que, na maioria das comparações, os coeficientes de correlação foram altos, positivos e significativos (Apêndice G). Para M100, os valores de r variaram de intermediários a elevados, entre 0,54* e 0,88**, enquanto para RP oscilaram entre 0,48* e 0,90**. Já para a avaliação visual de grãos, as correlações oscilaram de 0,52* e 0,82**. Esses resultados indicam que o desempenho relativo dos genótipos se manteve consistente nos diferentes ambientes e fontes de N, evidenciando predominância de interação do tipo simples, com poucas alterações no ranqueamento dos genótipos.

Tabela 5. Resumo das análises de variância conjuntas para massa de 100 grãos (M100 - g), avaliação visual de grão (AVG - notas) e rendimento de peneira (RP - %) de quinze linhagens e quatro testemunhas de feijão-comum preto avaliadas nos estados de Goiás, Paraná e Brasília, em três épocas de semeadura, em 2023 e 2024, sob duas fontes de nitrogênio (FBN e adubação mineral nitrogenada).

Fonte de variação	M100			AVG			RP		
	GL ¹	QM ²	P-valor	GL	QM	P-valor	GL	QM	P-valor
Genótipos (G)	18	85,71	0,00	18	2,55	0,00	18	1637,76	0,00
Linhagens (L)	14	57,58	0,00	14	0,84	0,00	14	1676,70	0,00
Testemunhas (T)	3	241,99	0,00	3	9,94	0,00	3	1996,60	0,00
L vs T	1	10,72	0,00	1	4,36	0,00	1	16,00	0,51
Ambientes (A)	5	259,92	0,00	2	37,55	0,00	2	3615,70	0,00
Fontes de N (FN)	1	24,13	0,00	1	0,05	0,63	1	97,40	0,10
G x A	90	3,64	0,00	36	0,72	0,00	36	411,07	0,00
L x A	70	3,98	0,00	28	0,69	0,00	28	380,34	0,00
T x A	15	2,15	0,00	6	0,86	0,00	6	343,32	0,00
L vs T x A	5	3,40	0,00	2	0,71	0,03	2	1044,50	0,00
G x FN	18	1,28	0,00	18	0,18	0,56	18	98,86	0,00
L x FN	14	0,58	0,47	14	0,16	0,64	14	61,42	0,06
T x FN	3	4,36	0,00	3	0,31	0,20	3	239,47	0,00
L vs T x FN	1	1,71	0,09	1	0,06	0,58	1	201,00	0,02
A x FN	5	2,32	0,00	2	0,44	0,11	2	331,90	0,00
G x A x FN	90	0,79	0,03	36	0,14	0,89	36	91,71	0,00
L x A x FN	70	0,65	0,29	28	0,13	0,90	28	81,85	0,00
T x A x FN	15	1,43	0,00	6	0,23	0,34	6	165,17	0,00
L vs T x A x FN	5	0,83	0,23	2	0,02	0,93	2	9,50	0,77
Resíduo	432	0,59	-	216	0,20	-	216	36,70	-
Média geral	22,07			1,57			67,99		
CV ³	10,39			48,8			20,62		
AS ⁴	0,99			0,96			0,98		

¹Graus de liberdade; ²Quadrante médio; ³Coefficiente de variação; ⁴Acurácia seletiva.

Para a massa de 100 grãos, observou-se variação significativa entre as médias dos genótipos, com destaque para a linhagem CNFP 21685, que apresentou a maior média geral (25,5 g), superando a média do conjunto de genótipos e sendo estatisticamente semelhante à testemunha BRS FP403 (25,2 g) (Tabela 6). Além disso, as linhagens CNFP 21622, CNFP 21642, CNFP 21651, CNFP 21660, CNFP 21673, CNFP 21675 e CNFP 21688, bem como a testemunha BRS FP417 apresentaram massa de 100 grãos superior a 22 g, evidenciando desempenho favorável para esse caráter. Atualmente, valores iguais ou superiores a 22 g são considerados ideais para o feijão-comum preto para agregar maior valor comercial no mercado brasileiro (Costa et al., 2024). De modo geral, as maiores médias de M100 foram registradas nos ambientes com nitrogênio mineral, entretanto, as diferenças em relação ao tratamento com FBN foram pouco expressivas para a maioria das linhagens. Esse resultado indica que a massa de 100 grãos foi relativamente estável entre os sistemas de fornecimento de nitrogênio.

Os resultados do aspecto visual dos grãos (AVG) indicaram que a maioria das linhagens apresentou elevada qualidade comercial, refletindo grãos uniformes, de coloração preta intensa e boa aparência comercial (Tabela 7). O valor médio geral observado (1.57) evidencia padrão comercial satisfatório para os genótipos avaliados. Esses resultados corroboram Namayanja et al. (2021), que associam a estabilidade do aspecto visual dos grãos à elevada herdabilidade dessa característica. Embora a inoculação com *Rhizobium* não altere diretamente atributos visuais como coloração ou brilho, pode contribuir para o desempenho produtivo das linhagens, conforme destacado por Magalhães et al. (2021), reforçando a inoculação como prática agronomicamente recomendável.

Valores de rendimento de peneira (RP%) superiores a 70%, são considerados adequados para atender às exigências da indústria, pois indicam maior proporção de grãos graúdos e uniformes, característica diretamente relacionada à padronização e ao padrão comercial do produto (Dias et al., 2020). Além de refletir a qualidade física dos grãos, o RP elevado está associado a melhor desempenho no beneficiamento, menores perdas durante o processamento e maior rendimento final, fatores que aumentam a eficiência industrial e a aceitação pelo mercado consumidor (Carbonell et al., 2010).

Nesse contexto, destacam-se as linhagens CNFP 21617, CNFP 21629, CNFP 21630, CNFP 21651, CNFP 21660, CNFP 21673, CNFP 21675 e CNFP 21685, que apresentaram valores superiores a 70%, atendendo plenamente aos padrões exigidos pela indústria (Tabela 6).

Em comparação, Dias et al. (2020) reportaram rendimentos de peneira de 60,5% e 62,6% sob manejo com nitrogênio mineral e com inoculação com rizóbio, respectivamente, valores inferiores aos observados no presente estudo. Adicionalmente, pode-se observar que no trabalho de Dias et al. (2020), as testemunhas BRS FP403 e BRS Esplendor apresentaram maiores médias de rendimento de peneira sob diferentes fontes de manejo de nitrogênio, embora ainda abaixo dos resultados obtidos para as linhagens mais promissoras avaliadas neste estudo.

Observou-se significância para a interação genótipos por ambientes para as três variáveis (Tabela 5), evidenciando que a resposta dos genótipos foi influenciada pelas condições específicas de cada local. Variabilidade semelhante também foi relatada em outros trabalhos (Costa et al., 2025a; Dias et al., 2020; Pereira et al., 2015b). As análises de estabilidade foram realizadas para os caracteres de massa 100 grãos (M100) e rendimento de peneira (RP). Para a variável avaliação visual de grãos (AVG), a análise das médias gerais, considerando as duas fontes de N, permitiu caracterizar adequadamente a resposta das linhagens entre os ambientes. Da mesma forma, foram utilizados gráficos bidimensionais, construídos com base nos valores de WAAS e WAASY (Tabela 6), considerando conjuntamente as duas fontes de nitrogênio, permitindo a avaliação simultânea da estabilidade e do desempenho dos genótipos nos diferentes ambientes.

Tabela 6. Médias, índice de estabilidade WAAS (*Weighted Average of Absolute Scores*) e índice de superioridade WAASY (*Weighted Average of the Stability and mean performance*) para massa de 100 grãos (M100-g) e rendimento de peneira (RP-%), e médias gerais para avaliação visual de grãos (AVG-escala de notas), de 19 linhagens e quatro testemunhas de feijão-comum preto, avaliadas sob fixação biológica de nitrogênio (FBN) e na análise geral (FBN e adubação nitrogenada mineral), em experimentos realizados nos estados de Goiás, Paraná e Brasília, em três épocas de semeadura, em 2023 e 2024.

Genótipo	M100 grãos (g)						RP (%)						AVG
	Geral			FBN			Geral			FBN			Geral
	Média	WAAS	WAASY	Média	WAAS	WAASY	Média	WAAS	WAASY	Média	WAAS	WAASY	Média
CNFP 21617	21,8 d	0,28	59,78	21,6 e	0,26	53,09	75,2 a	0,91	7,59	75,5 a	1,44	74,94	1,4 a
CNFP 21619	21 e	0,67	26,80	20,7 f	0,51	21,64	66,4 c	2,52	3,06	62,0 c	2,29	35,96	1,5 a
CNFP 21622	22,4 c	0,44	54,11	22,3 d	0,59	26,65	53,2 e	0,54	4,50	53,7 d	0,56	48,15	1,7 b
CNFP 21629	21,3 e	0,12	65,90	21,2 e	0,10	65,48	75,6 a	1,15	7,22	75,7 a	1,30	77,81	1,4 a
CNFP 21630	21,9 d	0,25	62,28	21,6 e	0,21	58,15	72,6 b	0,29	8,30	73,2 b	0,37	89,00	1,7 b
CNFP 21640	21,1 e	0,50	39,08	20,9 f	0,30	43,17	63,6 d	1,65	4,21	60,8 c	1,62	43,55	1,4 a
CNFP 21642	22,7 c	0,49	53,14	22,5 d	0,61	26,67	52,1 e	0,82	3,78	53,4 d	1,14	37,61	1,5 a
CNFP 21649	20,7 f	0,37	45,14	20,7 f	0,29	42,76	62,2 d	1,06	5,08	59,0 c	1,18	49,56	1,5 a
CNFP 21651	22,6 c	0,86	26,30	22,3 d	0,54	31,61	75,6 a	1,46	6,63	78,9 a	0,90	90,86	1,7 b
CNFP 21660	22,3 c	0,26	65,04	22,2 d	0,26	57,84	78,2 a	1,67	6,71	77,9 a	1,52	78,13	1,2 a
CNFP 21661	20,3 f	0,31	45,81	20,1 g	0,21	45,71	61,1 d	1,55	3,96	61,0 c	2,06	36,22	1,6 b
CNFP 21673	22,5 c	0,34	61,14	22,6 d	0,32	55,10	77,7 a	0,45	8,90	78,6 a	0,38	99,15	1,4 a
CNFP 21675	23,5 b	0,41	64,70	23,4 c	0,47	47,38	71,8 b	0,72	7,36	72,2 b	1,12	74,18	1,3 a
CNFP 21685	25,5 a	0,22	93,50	25,5 a	0,33	77,14	81,1 a	1,25	7,97	78,5 a	2,37	64,71	1,3 a
CNFP 21688	22,2 d	0,27	63,33	21,0 d	0,28	54,37	55,5 e	0,89	4,23	57,2 d	0,81	50,58	2,1 c
BRS Esplendor	19,3 g	0,12	49,99	19,2 h	0,21	38,72	52,2 e	0,75	3,95	52,0 d	0,73	43,82	1,6 b
BRS FP403	25,2 a	0,42	77,51	24,8 b	0,22	83,42	75,6 a	0,17	9,06	72,8 b	0,57	84,78	1,3 a
BRS FP417	22,4 c	0,39	56,75	22,4 d	0,33	52,43	69,5 c	0,74	6,93	70,4 b	0,61	79,34	1,3 a
NORH54	20,4 f	0,37	42,26	19,7 g	0,58	5,97	72,0 b	2,85	3,60	66,1 c	3,25	25,38	2,9 d
Geral	22,1	-	-	21,9	-	-	68,0	-	-	67,5	-	-	1,57

Médias seguidas por mesmas letras minúsculas na coluna e maiúsculas na linha não diferem estatisticamente entre si (Scott-Knott, $\alpha=5\%$).

A análise biplot apresentada na Figura 2A considerando as duas fontes de N, teve como objetivo identificar linhagens estáveis e com desempenho médio elevado, visando a seleção de materiais com adaptação geral. Essas linhagens foram posteriormente comparadas às de maior produtividade, a fim de determinar quais materiais apresentam bom desempenho e corroborar a consistência das informações obtidas.

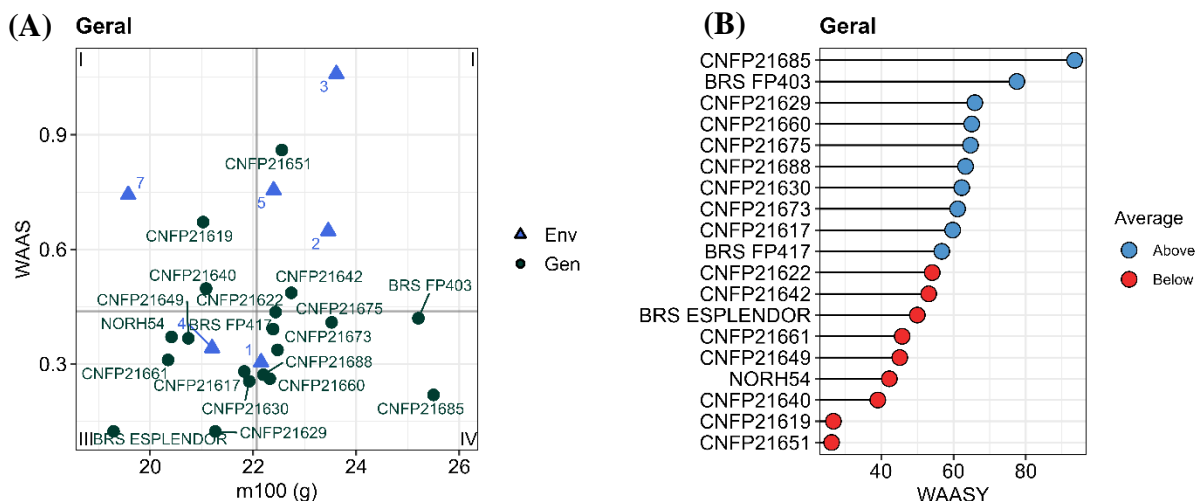


Figura 2. Biplot da massa de 100 grãos (g) vs. WAAS (*Weighted Average of Absolute Scores*) e valores estimados de WAASY (*Weighted Average of the stability and mean performance*) de 19 genótipos de feijão comum, considerando a análise geral (FBN e adubação mineral nitrogenada) (A e B). Ambientes: 1- Santo Antônio de Goiás-GO, inverno de 2023; 2- Brasília-DF, inverno de 2023; 3- Ponta Grossa-PR, águas de 2023; 4- Ponta Grossa-PR, seca de 2024; 5- Santo Antônio de Goiás-GO, inverno de 2024; 7- Ponta Grossa-PR, águas de 2024.

Na análise geral (Figura 2C), observa-se que as linhagens CNFP 21673, CNFP 21685, CNFP 21660 e CNFP 21688 posicionaram-se no quadrante IV do biplot, indicando maiores valores de massa de 100 grãos associados à estabilidade. Esse comportamento evidencia o potencial dessas linhagens nos diferentes ambientes avaliados, considerando conjuntamente a fixação biológica de nitrogênio e a adubação mineral nitrogenada. Destaca-se ainda a linhagem CNFP 21675, que também se posicionou nesse quadrante, evidenciando massa de 100 grãos elevada aliada à estabilidade na análise geral.

Para avaliação do índice de superioridade WAASY referente à massa de 100 grãos (M100), foram atribuídos pesos de 50% para a média do caráter e 50% para a estabilidade,

adotando-se ponderação equilibrada entre ambos os componentes. Em contraste, para a produtividade de grãos, utilizou-se ponderação de 60% para a média produtiva e 40% para a estabilidade, considerando a maior importância agrônômica do rendimento no processo de seleção. Os valores de WAASY das linhagens e testemunhas estão apresentados na Tabela 6, e o biplot referente à análise geral (Figura 2B) evidenciou elevada concordância na identificação dos genótipos superiores.

Na análise geral, oito linhagens e duas testemunhas apresentaram valores de WAASY acima da média, sendo representadas pelos marcadores azuis no biplot. Esse resultado indica que essas linhagens se destacam quanto à massa de 100 grãos associada à estabilidade, demonstrando consistência para M100 nos diferentes ambientes avaliados e evidenciando potencial para seleção.

Os resultados obtidos no presente estudo estão em consonância com aqueles relatados no trabalho de Costa et al. (2025b), no qual as linhagens foram inicialmente selecionadas sob sistema exclusivo de fixação biológica de nitrogênio com base no rendimento de grãos, massa de 100 grãos e caracteres fisiológicos associados à eficiência nodular. No referido estudo, foi observada variabilidade genética significativa e identificadas linhagens superiores com desempenho agrônômico promissor. O fato de parte dessas linhagens voltar a se destacar na presente análise geral, apresentando maiores valores de massa de 100 grãos associados à estabilidade, reforça a consistência do processo de seleção prévio. Além disso, enquanto o estudo anterior enfatizou a eficiência sob FBN, os resultados atuais ampliam essa evidência ao demonstrar que essas linhagens mantêm estabilidade fenotípica quando avaliadas conjuntamente sob fixação biológica e adubação mineral nitrogenada. Dessa forma, os achados confirmam o potencial dessas linhagens para avançar no programa de melhoramento, associando qualidade de grãos e estabilidade em diferentes condições de cultivo.

Para rendimento de peneira (RP), foi considerada a análise conjunta dos ambientes, contemplando tanto a inoculação com rizóbio quanto a adubação mineral nitrogenada (Figura 3A). No biplot RP x WAAS, os genótipos localizados no quadrante IV destacam-se por combinar elevado desempenho médio com maior estabilidade, sendo considerados mais desejáveis para o caráter. Nesse contexto, observou-se que diversas linhagens apresentaram posicionamento favorável nesse quadrante, indicando bom rendimento de peneira aliado à estabilidade entre os ambientes avaliados.

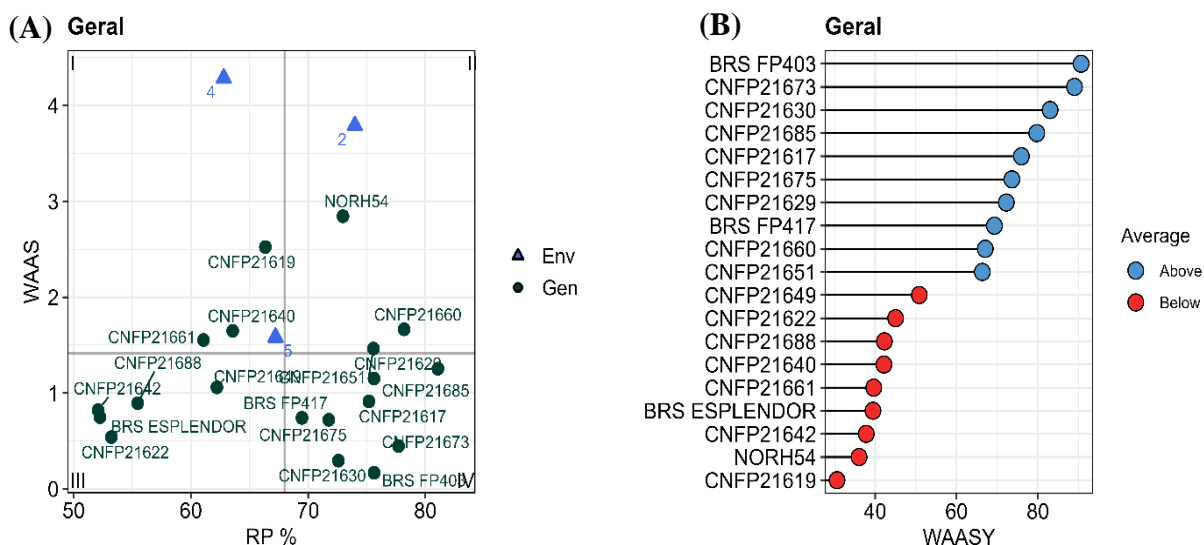


Figura 3. Biplot do rendimento de peneira (%) vs. WAAS (*Weighted Average of Absolute Scores*) e valores estimados de WAASY (*Weighted Average of the stability and mean performance*) de 19 genótipos de feijão comum, considerando a análise geral (FBN e adubação mineral nitrogenada) (A e B). Ambientes: 2- Brasília-DF, inverno de 2023; 4- Ponta Grossa-PR, seca de 2024; 5- Santo Antônio de Goiás-GO, inverno de 2024.

A linhagem CNFP 21660 apresentou alto rendimento de peneira, porém com valores de WAAS relativamente maiores, sugerindo maior sensibilidade à variação ambiental. Em contraste, algumas linhagens posicionadas próximas à origem do eixo WAAS demonstraram maior estabilidade associada a desempenho satisfatório para o caráter.

Na análise baseada no índice WAASY (Figura 3B), que integra simultaneamente desempenho médio e estabilidade, observou-se que vários genótipos apresentaram valores acima da média, destacando-se como materiais promissores para rendimento de peneira. Esses resultados indicam a presença de linhagens com desempenho consistente sob diferentes manejos de nitrogênio, evidenciando potencial para seleção em programas de melhoramento voltados à estabilidade produtiva e à qualidade comercial dos grãos.

Entre os genótipos que combinaram alto rendimento de peneira e elevada estabilidade produtiva, destacaram-se as cultivares testemunha BRS FP403 e BRS FP417 (Figura 3B). Esses resultados estão em concordância com Aguiar et al. (2023), que relataram elevado potencial produtivo dessas cultivares e bom desempenho sob condições de adubação

mineral nitrogenada, reforçando sua robustez como materiais de referência em diferentes sistemas de manejo de nitrogênio.

De modo geral, os resultados obtidos estão alinhados com estudos anteriores (Pereira et al., 2015, Costa et al., 2025a; Dias et al., 2020b), os quais destacam que genótipos amplamente recomendados tendem a apresentar desempenho consistente em diferentes condições de cultivo. Dessa forma, a identificação de linhagens com alto desempenho e estabilidade contribui para o desenvolvimento de cultivares mais resilientes e eficientes, fortalecendo programas de melhoramento voltados à sustentabilidade os sistemas produtivos.

De forma integrada, considerando simultaneamente altas médias e elevada estabilidade para massa de 100 grãos e rendimento de peneira, bem como desempenho superior na avaliação visual dos grãos, destacam-se como as linhagens mais promissoras para qualidade de grãos as CNFP 21685, CNFP 21673, CNFP 21660, CNFP 21629 e CNFP 21675. A linhagem CNFP 21685 apresentou melhor desempenho global, com a maior massa de 100 grãos, elevado rendimento de peneira e médias visuais favoráveis, aliadas a baixos valores de WAAS/WAASY, indicando ampla estabilidade. As linhagens CNFP 21673 e CNFP 2660 combinam massas de grãos acima da média geral, altos rendimentos de peneira, excelente avaliação visual e comportamento estável nos ambientes avaliados, reforçando sua consistência para atributos comerciais. Já a CNFP 21629 se destaca pela elevada estabilidade associada a bom rendimento de peneira e ótima qualidade visual dos grãos, mesmo apresentando massa de 100 grãos ligeiramente inferior às líderes. Em conjunto, esses genótipos reúnem atributos físicos e visuais desejáveis, com desempenho consistente entre ambientes, sendo, portanto, os mais indicados para avanço nas etapas subsequentes do programa de melhoramento com foco em qualidade de grãos.

4.1.3 Teor de clorofila, porcentagem de nitrogênio derivado da atmosfera e nitrogênio total.

Para a variável teor de clorofila (TC) foram realizadas três medições ao longo do ciclo da cultura, que não apresentaram diferenças significativas; por isso, optou-se por utilizar o valor médio das medições. A variável TC apresentou coeficiente de variação baixo, indicando boa precisão experimental. No entanto, apresentou acurácia seletiva (AS) moderada (Tabela 7),

possivelmente devido à ausência de significância para a fonte de variação genótipos. Os valores de CVs e AS das análises individuais apresentados no Apêndice G, corroboram esses resultados.

De modo geral, não foi observado efeito significativo em genótipos sobre o teor de clorofila. Estudos brasileiros mostram que o teor de clorofila medido por clorofilômetro (SPAD) é um bom indicador do estado nutricional foliar e, em muitos casos, apresentam menor variabilidade entre genótipos frente a ambientes contrastantes quando comparado com características de rendimento. Assim, a ausência de interação significativa para a clorofila concorda com resultados anteriores em feijão-comum, nos quais o teor de clorofila se manteve relativamente estável (Pereira et al., 2016; Soratto, 2004; Teixeira et al., 2004).

A interação linhagem por fonte de nitrogênio (L x FN) foi não significativa, indicando que não houve variação observada entre as fontes de N e que as linhagens possuem capacidade semelhante de aproveitamento do nitrogênio, independentemente de ser proveniente de inoculação com rizóbio ou de adubação nitrogenada mineral.

Tabela 7. Resumo das análises de variância conjuntas para teor de clorofila (TC - mg m⁻² SPAD), avaliado sob fixação biológica de nitrogênio (FBN) e adubação mineral nitrogenada, e para porcentagem de nitrogênio derivado da atmosfera (%NDFA - %) e nitrogênio total (n total - %), avaliados sob FBN, em quinze linhagens e quatro testemunhas de feijão-comum preto em experimentos conduzidos em Santo Antônio de Goiás-GO, em três épocas de semeadura, em 2024 e 2025.

Fonte de variação	TC			%NDFA			N total		
	GL ¹	QM ²	P-valor	GL	QM	P-valor	GL	QM	P-valor
Genótipo (G)	18	5,02	0,18	17	329,8	0,00	17	0,12	0,02
Linhagem (L)	14	4,31	0,33	14	355,4	0,00	14	0,14	0,01
Testemunhas (T)	3	9,11	0,07	2	172,2	0,01	2	0,009	1,00
L vs T	1	2,74	0,40	1	286,9	0,00	1	0,00	1,00
Ambiente (A)	1	693,85	0,00	1	1077,7	0,00	1	17,85	0,00
Fonte de N (FN)	1	254,19	0,00	-	-	-	-	-	-
G x A	36	5,58	0,86	17	546,6	0,00	17	0,07	0,30
L x A	28	4,98	0,90	14	541,9	0,00	14	0,07	0,21
T x A	6	9,31	0,29	2	725,5	0,00	2	0,03	0,89
L vs T x A	2	2,74	0,70	1	253,6	0,00	1	0,03	0,83
G x FN	18	2,99	0,71	-	-	-	-	-	-
L x FN	14	3,02	0,67	-	-	-	-	-	-
T x FN	3	2,39	0,60	-	-	-	-	-	-
L vs T x FN	1	4,37	0,28	-	-	-	-	-	-
A x FN	2	275,75	0,00	-	-	-	-	-	-
G x A x FN	36	4,19	0,98	-	-	-	-	-	-
L x A x FN	28	5,28	0,87	-	-	-	-	-	-
T x A x FN	6	0,22	1,00	-	-	-	-	-	-
L vs T x A x FN	2	0,85	0,89	-	-	-	-	-	-
Resíduo	144	3,79	-	70	74,2	-	70	0,05	-
Média geral ³	43,34			55,3			2,71		
CV ⁴	7,02			15,6			8,95		
AS ⁵	0,49			0,88			0,72		

¹Graus de liberdade; ²Quadrante médio; ³Média geral; ⁴Coeficiente de variação; ⁵Acuracia seletiva,

Esta descoberta é agronomicamente relevante, pois apoia o uso da inoculação com rizóbio com uma alternativa sustentável e eficaz aos fertilizantes nitrogenados minerais para manter a capacidade fotossintética da planta. Como apontam Oliveira et al. (2017), a inoculação com rizóbio pode melhorar significativamente o conteúdo total de clorofila nas folhas do feijão comum. A resposta uniforme das diferentes linhagens demonstra que essa prática pode ser amplamente adotada, oferecendo flexibilidade no manejo do nitrogênio sem comprometer um componente essencial para o crescimento e desenvolvimento da cultura.

Do mesmo modo, não foram observadas interações significativas para genótipo por ambiente (G x A) para o teor de clorofila (Tabela 7). As correlações de Spearman para o TC entre os ambientes não foram significativas, indicando que, nas condições avaliadas, essa variável não apresentou associação estatisticamente consistente entre as duas fontes de N. Esse resultado pode estar relacionado à ausência de evidência estatística suficiente para confirmar que as correlações observadas sejam reais e não decorrentes do acaso (Li et al., 2025; Medeiros, Ladio e Albuquerque, 2014).

A média de TC foi 44,34 mg m⁻², as plantas mantiveram níveis semelhantes de clorofila foliar. A ausência de variação sugere que o teor de clorofila não foi um caráter discriminante nessas condições experimentais e que o fornecimento de N, seja por fertilização ou por fixação biológica, foi suficiente para sustentar o aparato fotossintético dos genótipos avaliados.

Em relação a razão isotópica de ¹⁵N ($\delta^{15}\text{N}$), utilizada no cálculo da porcentagem de nitrogênio derivado da atmosfera (%Ndfa) pelo método da abundância natural, os valores médios da linhagem não nodulante NORH54 foram de 1,65‰ e 1,68‰ nos ambientes de Santo Antônio de Goiás, nas safras das águas de 2024 e da seca de 2025, respectivamente. Por se tratar de uma linhagem incapaz de estabelecer simbiose, seus valores de $\delta^{15}\text{N}$ refletem exclusivamente o nitrogênio proveniente do solo, sendo, portanto, adotados como referências para estimar a contribuição do N atmosférico nos genótipos avaliados, conforme preconizado na literatura para esse método.

Resultados semelhantes foram relatados no estudo Unkovich et al. (2000), no qual a linhagem não nodulante NORH54 foi utilizada como controle para estimativas de fixação biológica de nitrogênio em feijão. Nesse trabalho, a técnica isotópica também foi empregada

para quantificar a contribuição do N atmosférico, confirmando a adequação da utilização de genótipos não nodulantes como referência do nitrogênio proveniente exclusivamente de solo. Esses achados reforçam a consistência metodológica do presente estudo na adoção da NORH54 como padrão isotópico para o cálculo do %NDFa pelo método da abundância natural.

Adicionalmente, o estudo Silva et al. (2017) evidenciam variação genética significativa na capacidade de fixação de N entre genótipos e entre estádios de desenvolvimento, indicando que diferenças observadas no %NDFa entre linhagens podem estar associadas tanto ao controle genético quanto à interação com o ambiente. Esse aspecto é particularmente relevante para interpretar as variações entre as safras das águas e da seca observadas.

Em relação ao %NDFa, observou-se efeito significativo de genótipo, com destaque para a decomposição em linhagens, que apresentou elevada significância. A comparação entre linhagens e testemunhas também foi significativa, evidenciando diferenças consistentes entre esses grupos. Da mesma forma, o efeito de ambiente e todas as interações analisadas foram estatisticamente significativas. Para o nitrogênio total, verificou-se efeito significativo apenas de genótipo e de ambiente, não sendo observada significância estatística para as interações (Tabela 7).

As diferenças significativas observadas entre os genótipos para o %NDFa confirmam a existência de variabilidade genética na eficiência da FBN no feijão-comum, corroborando o descrito por Unkovich et al. (2008), que destacam a forte dependência do genótipo e das interações genótipo por rizóbio por ambiente sobre a estimativa do N derivado da atmosfera. Estudos conduzidos por Oladzad et al. (2020), demonstraram que cinco genótipos apresentaram valores superiores a 60% de NDFa em condições de baixo N, indicando que percentuais acima desse limiar já são considerados elevados para a espécie. De forma semelhante, Farid e Navadi (2015), relataram variação significativa entre cultivares e efeitos de genótipo por ambiente sobre o NDFa, enquanto Gómez et al. (2016), identificaram múltiplos genótipos com maior capacidade de FBN, reforçando a existência da ampla variabilidade. Nesse contexto, a elevada %NDFa registrada na linhagem CNFP 21675 (76,94%) posiciona esse material superior ao frequentemente relatado na literatura, situando-o acima do limiar de 60% descrito para genótipos de alta eficiência simbiótica. Tal desempenho evidencia maior proporção de N derivado da atmosfera (Tabela 8), e sugere a presença de componentes genéticos favoráveis à nodulação e à eficiência da simbiose, podendo representar uma fonte

promissora para programas de melhoramento. evidenciando maior eficiência na fixação biológica de nitrogênio em comparação aos demais genótipos avaliados.

Tabela 8. Médias gerais para porcentagem de nitrogênio derivado da atmosfera (%NDFa - %) e nitrogênio total (n total - %), avaliados sob FBN, em quinze linhagens e quatro testemunhas de feijão-comum preto em experimentos conduzidos em Santo Antônio de Goiás-GO, em três épocas de semeadura, em 2024 e 2025.

Genótipo	%NDFa	N Total
CNFP 21617	57,27 c	2,91 a
CNFP 21619	51,10 c	2,79 a
CNFP 21622	50,50 c	2,63 b
CNFP 21629	63,69 b	2,77 a
CNFP 21630	51,62 c	2,72 a
CNFP 21640	61,84 b	2,77 a
CNFP 21642	48,34 c	2,50 b
CNFP 21649	61,29 b	2,58 b
CNFP 21651	53,63 c	3,02 a
CNFP 21660	52,44 c	2,82 a
CNFP 21661	49,18 c	2,83 a
CNFP 21673	57,12 c	2,80 a
CNFP 21675	76,94 a	2,44 b
CNFP 21685	47,78 c	2,64 b
CNFP 21688	57,45 c	2,59 b
BRS ESPLENDOR	56,19 c	2,75 a
BRS FP403	53,00 c	2,67 b
BRS FP417	45,73 c	2,72 a
NORH54	-	-
Geral	55,28	2,71

Médias seguidas por mesmas letras minúsculas (Scott-Knott, $\alpha = 5\%$) não diferem estatisticamente.

As linhagens CNFP 21629, CNFP 21640 e CNFP 21649 apresentaram valores intermediários de %NDFA, porém superiores à média geral (55,28%), refletindo contribuição moderada da FBN e desempenho promissor. Em contraste, os menores valores observados na maioria dos genótipos e nas testemunhas estão de acordo com Unkovich (2008), que ressalta que cultivares tendem a apresentar menor participação relativa da FBN, especialmente em condições com maior disponibilidade de N mineral.

Esses resultados também estão em consonância com Reinprecht et al. (2020), que demonstram que a FBN em feijão-comum apresenta caráter quantitativo e fortemente dependente do genótipo. Os autores ressaltam ainda que a aplicação de nitrogênio mineral reduz a %NDFA em diferentes níveis entre os genótipos, uma vez que o suprimento externo de N inibe a simbiose planta-rizóbio. Esse efeito negativo da adubação nitrogenada sobre a %NDFA reforça a importância da identificação e seleção de linhagens com maior capacidade de fixação sob níveis reduzidos de fertilização. Nesse contexto, o bom desempenho da CNFP 21675 e das linhagens com %NDFA intermediário evidencia seu potencial para uso em programas de melhoramento e em sistemas de produção com menor dependência de fertilizantes nitrogenados.

As diferenças significativas detectadas no teor de nitrogênio total entre os genótipos evidenciam contrastes na capacidade de absorção, assimilação e uso do N, independentemente de sua origem. De acordo com Sinclair e Vadez (2012), uma maior contribuição relativa da FBN não implica necessariamente uma maior acumulação total de N no tecido vegetal, o que é coerente como os resultados observados. Nesse sentido, embora a linhagem CNFP 21675 tenha apresentado o maior %NDFA, seus valores de N total foram inferiores aos de outros genótipos, indicando que a eficiência simbiótica não se traduziu em maior acumulação de N. Por outro lado, onze linhagens apresentaram médias altas de N total, o que sugere maior eficiência na obtenção e utilização do nitrogênio, seja proveniente do solo ou da FBN. Esse padrão confirma a importância, destacada por Sinclair e Vadez (2012), de avaliar conjuntamente a FBN e o acúmulo total de N, especialmente em programas de melhoramento voltados para produtividade e a eficiência simbiótica.

4.1.4 Índice de seleção e correlação entre caracteres

O índice MGIDI (*Multi-Trait Genotype–Ideotype Index*) foi utilizado neste estudo com o objetivo principal de selecionar linhagens superiores com base no desempenho conjunto dos caracteres avaliados tanto em ensaios conduzidos a campo quanto em casa de vegetação. Ressalta-se que as análises foram realizadas exclusivamente com dados obtidos sob condições de FBN, priorizando ambientes em que os genótipos foram avaliados nesse sistema, em consonância com o objetivo de recomendar linhagens adaptadas à FBN.

Esse índice incorpora a análise fatorial para contornar problemas de dependência linear entre caracteres, permitindo a seleção simultânea com base em múltiplos atributos (Klein et al., 2023). Considerando uma intensidade de seleção de 35%, foram selecionadas as linhagens CNFP21675, CNFP21685, CNFP21660, CNFP21673 e CNFP21629, as quais apresentaram os menores valores do índice e, conseqüentemente, maior proximidade ao ideótipo multicaracterístico estabelecido (Figura 5A).

As linhagens selecionadas apresentaram desempenho superior sob condição de FBN, com destaque para CNFP 21675, CNFP 21685, CNFP 21660 e CNFP 21622, que exibiram elevadas médias de produtividade sob inoculação. Entre essas, CNFP 21685 e CNFP 21660 se sobressaíram pela combinação de alta produtividade e maior estabilidade produtiva, enquanto CNFP 21622 destacou-se principalmente pelo alto rendimento sob FBN.

A linhagem CNFP 21675 apresentou o maior percentual de nitrogênio derivado da atmosfera, evidenciando elevada eficiência de fixação biológica. De forma semelhante, CNFP 21629 também se destacou pelo alto %NDFa, reforçando seu potencial em sistemas baseados na FBN.

Dessa forma, CNFP 21675, CNFP 21685, CNFP 21660, CNFP 21622 e CNFP 21629 reúnem os atributos mais favoráveis sob inoculação, seja pela alta produtividade, maior estabilidade ou maior contribuição do N atmosférico, constituindo as principais recomendações para cultivo em sistemas dependentes da fixação biológica de nitrogênio.

Dessa forma, essas linhagens se consolidam como as mais promissoras e são indicadas para avanço nas etapas subsequentes do programa de melhoramento, especialmente para ensaios de valor de cultivo e uso (VCU), com elevado potencial de contribuição para sistemas produtivos mais eficientes e sustentáveis baseados na FBN.

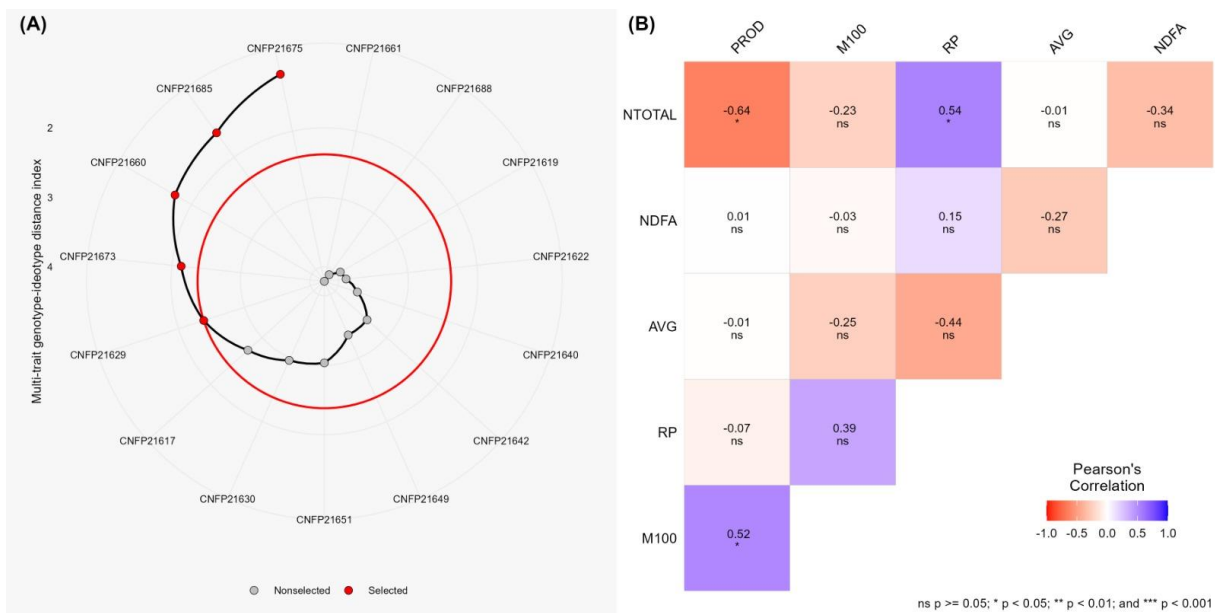


Figura 5. (A) Ranking de 15 linhagens de feijão-comum preto avaliadas sob FBN com base no Índice MGIDI (*Multi-Trait Genotype-Ideotype Index*) para os caracteres mensurados em campo: produtividade de grãos (PROD-kg ha⁻¹), massa de 100 grãos (M100-g), rendimento de peneira (RP-%), avaliação visual de grãos (AVG-escala de notas), porcentagem de nitrogênio derivado da atmosfera (NDFA-%) e nitrogênio total (%). A linha vermelha refere-se à intensidade de seleção de 35%. (B) Coeficientes de correlação de Pearson entre os caracteres mensurados em campo, sob FBN.

Em relação às estimativas de correlação de Pearson, a Figura 5B indica que, sob condições de FBN, a produtividade de grãos apresentou correlação negativa moderada com o nitrogênio total (-0,64*), sugerindo que maiores concentrações de N no tecido vegetal não se traduzem necessariamente em maior rendimento. Esse comportamento pode estar associado ao efeito de diluição ou a diferenças na eficiência de uso do nitrogênio entre os genótipos, indicando que a acumulação de N nem sempre é proporcional ao desempenho produtivo. Por outro lado, observou-se correlação positiva moderada entre produtividade e rendimento de peneira (0,54), bem como entre produtividade e massa de 100 grãos (0,52), indicando que genótipos mais produtivos tendem a apresentar melhor classificação comercial e maior tamanho de grão. A associação positiva entre rendimento de peneira e massa de 100 grãos (0,39) reforça essa relação entre atributos físicos do grão.

Esses resultados corroboram achados da literatura que apontam a massa de 100 grãos com um dos principais componentes associados ao rendimento em feijão comum.

Tamango et al. (2018) identificaram associação positiva e alto efeito direto da massa de 100 grãos sobre a produtividade, recomendando esse caráter como critério de seleção. De forma semelhante, Kamaluddin e Anmed (2011), relataram correlação positiva e efeito direto favorável desse caráter sobre o rendimento, reforçando sua importância na seleção indireta. Além disso, Oliveira et al. (2018), destacaram a massa de 100 grãos como um dos componentes primários com maior potencial para ganhos em produtividade.

Estudos de avaliação multiambiente também evidenciam que linhagens que combinam alto rendimento e elevada massa de 100 grãos apresentam melhor desempenho agrônomico e estabilidade produtiva, reforçando a utilidade prática desse caráter em programas de melhoramento (Pereira et al., 2017; Silva et al., 2023)

Em contraste, a porcentagem de nitrogênio derivado da atmosfera (%NDFa) apresentou correlações baixas e não significativas com os demais caracteres, evidenciando que a eficiência da fixação biológica de nitrogênio ocorreu de forma relativamente independente da produtividade e das características físicas dos grãos. Esses resultados sugerem a possibilidade de selecionar genótipos simultaneamente eficientes na FBN e produtivos, sem que haja necessariamente relação direta entre essas variáveis, aspecto relevante para programas de melhoramento que visam ganhos conjuntos em eficiência nutricional e desempenho agrônomico.

De forma complementar, estudos prévios com feijão-comum inoculado com rizóbio indicam que a porcentagem de nitrogênio derivado da atmosfera apresenta associação com caracteres fisiológicos e agrônomicos, além de apresentar controle genético e variação em função das interações entre genótipos e cepas de rizóbio. Hardarson et al. (1993) e Kumarasinghe et al. (1992) relataram que diferenças no %NDFa estão relacionadas à eficiência da nodulação e ao desempenho das plantas.

4.2 EXPERIMENTOS DE CASA DE VEGETAÇÃO

4.2.1 Caracteres relacionados à FBN

As análises de variância conjuntas evidenciaram efeitos significativos de genótipos e de ambiente para a maioria dos caracteres avaliados, indicando a existência de variabilidade

genética e forte influência das condições experimentais sobre os processos de crescimento e nodulação do feijão-comum (Tabela 9). Para a massa específica de nódulos e a área nodular, os coeficientes de variação, embora superiores a 25%, podem ser considerados aceitáveis. Os valores mais elevados de CV observados para as demais variáveis são comuns em estudos relacionados à FBN, uma vez que esse processo é altamente sensível a múltiplos fatores bióticos e abióticos, mesmo sob condições controladas (Pelegrin et al., 2009; Fonseca et al., 2013; Heilig et al., 2017a; Heilig et al., 2017b, Pacheco et al., 2020, Costa et al., 2025b). Sharma e Singh (2016) também relataram elevada variabilidade em avaliações associadas à FBN, destacando que altos valores de CV refletem a complexidade biológica do processo e não, necessariamente, limitações experimentais. Adicionalmente, as estimativas de acurácia seletiva foram superiores a 60%, indicando elevada confiabilidade experimental e adequada capacidade de discriminação dos genótipos avaliados (Resende e Duarte, 2007).

Para a massa seca total, não foram observadas diferenças significativas entre as linhagens, indicando comportamento semelhante dos genótipos quanto ao acúmulo de biomassa vegetal sob condições de inoculação com rizóbios (Tabela 9). Esse resultado sugere que as variações observadas nos caracteres nodulares não se refletiram diretamente no crescimento vegetativo das plantas em ambiente protegido. Entretanto, o efeito de ambiente foi altamente significativo, evidenciando a forte influência das condições experimentais sobre o crescimento das plantas.

Em relação ao número de nódulos, verificou-se efeito significativo de genótipos (Tabela 9), com diferenças expressivas entre as linhagens e entre as testemunhas, indicando variabilidade genética quanto à capacidade de formação de nódulos. Esse comportamento reflete diferenças na eficiência de estabelecimento da simbiose feijão-rizóbio entre os genótipos avaliados. Resultados semelhantes foram observados por Ramires et al. (2018), que relataram respostas diferenciadas de cultivares de feijão-comum quanto à nodulação sob inoculação com rizóbio.

Para a massa seca de nódulos observaram-se diferenças significativas entre os genótipos, especialmente entre as linhagens, evidenciando variações no desenvolvimento e no crescimento dos nódulos formados (Tabela 9). Esse caráter está diretamente relacionado à atividade simbiótica, uma vez que nódulos mais desenvolvidos tendem a apresentar maior potencial de FBN, corroborando resultados reportados Ramires et al. (2018).

A massa específica de nódulos apresentou diferenças significativas entre linhagens e testemunhas (Tabela 9), bem como na comparação entre esses grupos, indicando variações na densidade e na estrutura dos nódulos. Esse caráter mostrou-se mais sensível às variações ambientais, refletindo diferenças qualitativas no desenvolvimento nodular. De acordo com Straliozzo e Rumjanek (1999), características estruturais dos nódulos são fortemente influenciadas por fatores ambientais, como temperatura e condições microclimáticas, o que explica a maior sensibilidade observada para esse caráter.

Quanto à área nodular, não foram observadas diferenças significativas entre as linhagens, embora a comparação entre linhagens e testemunhas tenha sido significativa, indicando variações no padrão de desenvolvimento nodular entre os grupos avaliados. A área nodular está associada à superfície para a atividade simbiótica, sendo influenciada tanto por fatores genéticos quanto ambientais.

De forma complementar, Melo et al. (2009) ao avaliaram cultivares de feijão-caupi sob inoculação em casa de vegetação, observaram respostas diferenciadas entre cultivares quanto à nodulação, ao acúmulo de biomassa e ao estado nitrogenado das plantas. Os autores não verificaram efeito significativo das estirpes de rizóbio nem da interação cultivar por estirpe, indicando que as diferenças observadas estiveram associadas principalmente às características genéticas das plantas. Esses resultados reforçam que a eficiência da fixação biológica de nitrogênio é fortemente dependente do genótipo da planta hospedeira

De modo geral, o efeito de ambiente foi altamente significativo para todas as variáveis analisadas, demonstrando a forte influência das condições experimentais sobre o crescimento das plantas e os processos de nodulação. Por outro lado, a ausência de interação significativa entre genótipos e ambientes para a maioria dos caracteres indica desempenho semelhante dos genótipos nos diferentes ambientes avaliados, sugerindo estabilidade fenotípica desses caracteres em condições de casa de vegetação.

Tabela 9. Resumo das análises de variância conjuntas para massa seca total (MST – g planta⁻¹), número de nódulos (NN – unidade planta⁻¹), massa seca de nódulos (NN - mg planta⁻¹), massa específica de nódulo (MEN - mg nódulo⁻¹) e área nodular (AN – mm²) de 15 linhagens e cinco testemunhas de feijão-comum avaliadas em dois experimentos de casa de vegetação em condições de inoculação com rizóbios.

Fontes de variação	GL ¹	MST		NN		MSN		MEN		AN	
		QM ²	P-valor	QM	P-valor	QM	P-valor	QM	P-valor	QM	P-valor
Genótipos	19	0,497399	0,08	4358,64	0,00	2510,89	0,00	0,18	0,00	1,44	0,00
Linhagens	14	0,512135	0,06	3513,85	0,02	2317,24	0,01	0,12	0,01	0,98	0,08
Testemunhas	4	0,567834	0,03	8393,79	0,00	3500,79	0,00	0,30	0,00	0,97	0,09
L vs T	1	0,009363	1,00	45,02	1,00	1262,31	0,27	0,43	0,00	9,76	0,00
Ambientes	1	4,205522	0,00	32861,56	0,00	17572,86	0,00	15,70	0,00	51,60	0,00
G x A	19	0,368107	0,30	1432,91	0,70	1287,96	0,25	0,14	0,00	0,93	0,11
L x A	14	0,325704	0,44	802,79	0,98	1351,13	0,21	0,14	0,00	0,93	0,11
T x A	4	0,607491	0,02	2668,21	0,10	528,57	0,96	0,17	0,00	1,15	0,03
L vs T x A	1	0,004201	1,00	5313,35	0,00	3441,12	0,00	0,00	1,00	0,05	1,00
Resíduo	117	0,317331		1794,49		1050,20		0,06		0,63	
Média geral		1,154		82,38		67,46		0,88		2,79	
CV ³		48,84		51,42		48,04		27,95		28,54	
AS ⁴		0,60		0,77		0,76		0,81		0,74	

¹Graus de liberdade; ²Quadrado médio; ³coeficiente de variação; ⁴acurácia seletiva.

De modo geral, os genótipos avaliados apresentaram desempenho adequado para os caracteres relacionados à nodulação, evidenciando variabilidade genética e boa capacidade de estabelecimento da simbiose com o rizóbio (Tabela 10). Os caracteres avaliados mostraram-se eficientes na discriminação dos genótipos quanto à capacidade de nodulação, indicando diferenças no potencial simbiótico sob condições de fixação biológica de nitrogênio.

Esses resultados estão de acordo com estudos conduzidos em *Phaseolus vulgaris*, que relatam variação significativa entre genótipos para número e massa de nódulos, bem como para eficiência de fixação, demonstrando que há base genética para seleção de materiais superiores (Abu et al., 2024; Fenta et al., 2014). Assim, a variabilidade observada neste estudo confirma a possibilidade de identificar genótipos com maior eficiência simbiótica sob FBN.

A avaliação dos caracteres de nodulação (número de nódulos, massa nodular, massa específica e área nodular) permitiu identificar diferenças importantes entre os genótipos quanto à eficiência na FBN. A linhagem CNFP 21675, por exemplo, combinou alto número de nódulos com a maior massa nodular, evidenciando elevado potencial de fixação, enquanto as linhagens CNFP 21673 e CNFP 21660 apresentaram desempenho inferior. Genótipos com menor número de nódulos, como CNFP 21685 e BRS FP403, exibiram maior massa específica, sugerindo nódulos menos numerosos, porém mais desenvolvidos individualmente. A área nodular foi superior nas linhagens CNFP 21617, CNFP 21642, CNFP 21685 e CNFP 21688, enquanto a menor área foi observada em Ouro Negro não inoculado, evidenciando o efeito positivo da inoculação sobre o desenvolvimento nodular.

De acordo com o de Rodiño et al. (2011), a área nodular constitui um importante indicador do potencial funcional dos nódulos, pois reflete a superfície disponível para trocas metabólicas entre planta e rizóbio. No entanto, os autores ressaltam que valores elevados de área nodular devem ser interpretados em conjunto com outros caracteres, uma vez que maior área nem sempre implica maior eficiência de fixação. Dessa forma, os diferentes aspectos da nodulação não apenas evidenciam a variabilidade genética existente, mas também fornecem informações complementares sobre a capacidade dos genótipos de estabelecer associações simbióticas eficazes e potencial de crescimento e produtividade em condições de inoculação.

No entanto, para o feijão-comum, ainda não há na literatura a definição de uma área nodular ideal. Rodiño et al. (2011) não estabelecem valores numéricos ótimos para o tamanho ou a área dos nódulos nessa espécie, ressaltando que a espécie da nodulação deve ser avaliada

de forma integrada, considerando simultaneamente número, tamanho, massa e atividade dos nódulos. Nesse contexto, a presença de nódulos maiores ou com maior área nodular, como observado neste estudo, pode representar uma estratégia funcional de nodulação, caracterizada por nódulos menos numerosos, porém individualmente mais desenvolvidos. Em contraste, para a soja, recomendações técnicas indicam que nódulos com diâmetro mínimo de aproximadamente 2 mm tendem a ser mais ativos no processo de FBN, sendo utilizados como critério prático para avaliar FBN (Oliveira, 2024), embora tais valores não possam ser diretamente extrapolados para o feijão-comum.

A cultivar Ouro Negro é caracterizada como uma variedade de feijão-comum com elevada capacidade de FBN (Pacheco et al., 2020). No presente estudo, Ouro Negro sob inoculação apresentou médias de número de nódulos, massa seca de nódulos e área nodular semelhantes às observadas em diversas linhagens e testemunhas inoculadas (Tabela 10), confirmando seu bom desempenho simbiótico. Por outro lado, na ausência de inoculação, Ouro Negro apresentou redução expressiva no número de nódulos, massa nodular e área nodular, embora tenha mantido nodulação residual, possivelmente em função da presença de rizóbios nativos no solo utilizado. Esses resultados são consistentes com a descrição histórica da cultivar, lançada em 1993 com foco específico na alta eficiência de fixação biológica de nitrogênio, conforme relatado por Pelegrin et al. 2009.

De forma integrada, considerando simultaneamente a massa seca total, o número de nódulos, a massa seca e a massa específica de nódulos, bem como a área nodular, destacaram-se com os genótipos com melhor desempenho global para caracteres associados à FBN as linhagens CNFP 21617, CNFP 21640, CNFP 21642, CNFP 21649, CNFP 21651, CNFP 21675 e CNFP 21688, além da testemunha Pérola. Esses genótipos combinaram elevados valores de nodulação (NN), maior acúmulo de massa nodular (MSN) e áreas nodulares amplas, indicando nodulação quantitativa e qualitativa eficiente. Em especial, CNFP 21640 e CNFP 21675 apresentaram os maiores valores de número e massa de nódulos e massa específica de nódulos, sugerindo nódulos mais desenvolvidos. Assim, essas linhagens demonstram maior potencial simbiótico e as configuram como promissoras para programas de melhoramento visando maior eficiência da FBN em feijão-comum.

Tabela 10. Médias gerais para massa seca total (MST – g planta⁻¹), número de nódulos (NN – unidade planta⁻¹), massa seca de nódulos (MSN - mg planta⁻¹), massa específica de nódulo (MEN - mg nódulo⁻¹) e área nodular (AN – mm²) de 15 linhagens e cinco testemunhas de feijão-comum avaliadas em dois experimentos de casa de vegetação em condições de inoculação com rizóbio.

Genótipo	MST	NN	MSN	MEN	AN
CNFP21617	1,15 a	96,50 a	74,65 a	0,91 a	3,23 a
CNFP21619	1,37 a	66,50 b	71,04 a	1,06 a	3,13 a
CNFP21622	1,06 a	65,63 b	60,3 b	0,99 a	3,05 a
CNFP21629	0,93 a	79,25 b	60,14 b	0,76 b	2,85 a
CNFP21630	1,01 a	64,38 b	55,23 b	0,91 a	2,63 b
CNFP21640	1,66 a	111,75 a	97,94 a	0,92 a	2,80 a
CNFP21642	1,01 a	87,13 a	70,95 a	0,95 a	3,26 a
CNFP21649	1,30 a	85,25 a	77,85 a	0,94 a	3,14 a
CNFP21651	1,12 a	90,63 a	79,34 a	0,89 a	3,05 a
CNFP21660	0,95 a	62,13 b	50,03 b	0,84 b	3,02 a
CNFP21661	1,29 a	103,38 a	74,36 a	0,81 b	2,41 b
CNFP21673	0,67 a	57,88 b	34,93 b	0,68 b	2,02 b
CNFP21675	1,55 a	119,38 a	99,11 a	0,85 b	3,03 a
CNFP21685	1,06 a	48,00 b	56,15 b	1,21 a	3,33 a
CNFP21688	1,24 a	93,38 a	74,14 a	0,92 a	3,04 a
Pérola	1,61 a	136,75 a	94,35 a	0,75 b	2,46 b
BRS FP403	0,99 a	56,75 a	50,63 b	1,08 a	2,87 a
BRS Esplendor	0,97 a	79,88 b	55,74 b	0,75 b	2,27 b
Ouro Negro	1,11 a	84,75 a	71,4 a	0,82 b	2,30 b
Ouro Negro (não inoc)	1,03 a	58,38 b	40,84 b	0,55 b	1,91 b
Média	1,15	82,4	67,45	0,89	2,79

Médias seguidas por mesmas letras minúsculas (Scott-Knott, $\alpha = 5\%$) não diferem estatisticamente.

4.2.2 Índice de seleção e correlação entre caracteres

O índice MGIDI (*Multi-Trait Genotype-Ideotype Index*) também foi utilizado para selecionar linhagens superiores com base no desempenho conjunto dos caracteres avaliados em casa de vegetação. A aplicação do índice, considerando uma intensidade de seleção de 35%, resultou na seleção das linhagens CNFP21649, CNFP21640, CNFP21619, CNFP21675 e CNFP21617, que apresentaram os menores valores do índice e, portanto, maior proximidade ao ideótipo multicaracterístico estabelecido (Figura 7A).

De modo geral, essas linhagens se destacaram pelo desempenho superior para os caracteres relacionados à FBN, incluindo maior biomassa e maior capacidade de nodulação. Entretanto, apenas a linhagem CNFP21675 coincidiu com a seleção obtida em condições de campo, reforçando sua consistência em diferentes ambientes de avaliação. Além disso, CNFP21675 apresentou o melhor desempenho para %Ndfa, evidenciando seu elevado potencial de contribuição do nitrogênio atmosférico via simbiose. As demais linhagens, embora não tenham se destacado para caracteres agrônômicos em campo, apresentam potencial para utilização como genitores em programas de melhoramento, visando à incorporação de maior capacidade de nodulação e atributos associados à simbiose em cultivares superiores.

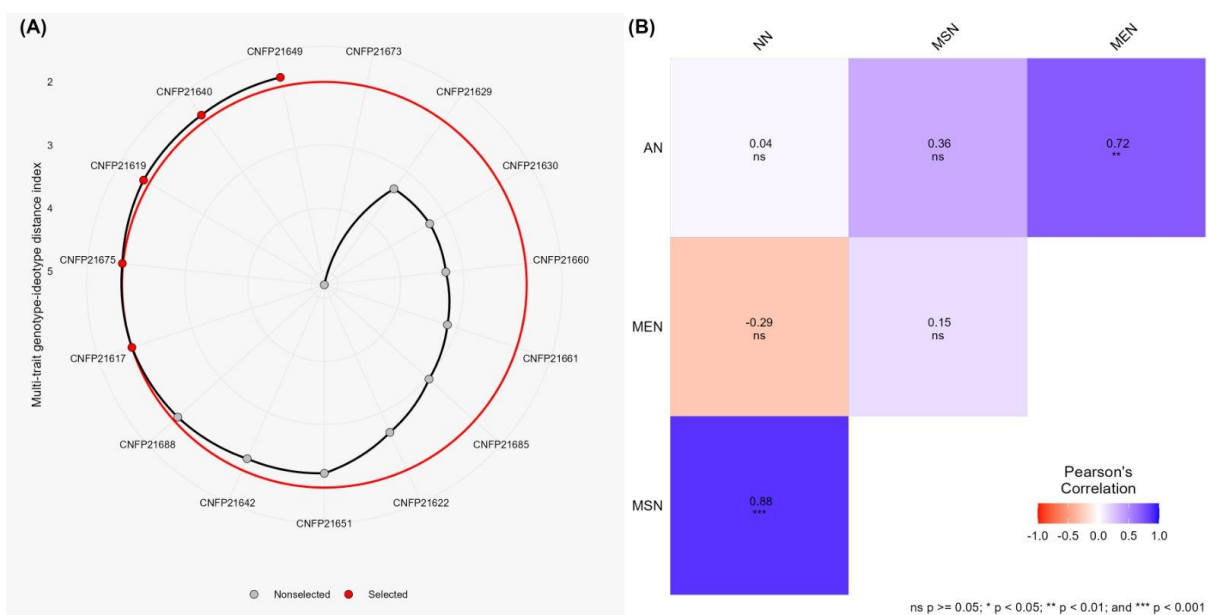


Figura 7. (A) Ranking de 15 linhagens de feijão-comum preto avaliadas sob FBN com base no Índice MGIDI (Multi-Trait Genotype-Ideotype Index) para os caracteres mensurados em casa de vegetação: número de nódulos (NN – unidade planta⁻¹), massa seca de nódulos (NN - mg planta⁻¹), massa específica de nódulo (MEN - mg nódulo⁻¹) e área nodular (AN – mm²). A linha vermelha refere-se à intensidade de seleção de 35%. (B) Coeficientes de correlação de Pearson entre os caracteres mensurados em casa de vegetação, sob FBN.

Em relação às estimativas dos coeficientes de correlação, os resultados apresentados na Figura 7B evidenciam que a massa seca de nódulos (MSN) apresentou correlação positiva muito alta e significativa com o número nódulos (NN) (0,88***), indicando

que o acúmulo de biomassa nodular é predominantemente determinado pela quantidade de nódulos formados. Esse resultado sugere que, sob condições de FBN, a formação de maior número de estruturas nodulares constitui o principal componente responsável pelo incremento da biomassa total destinada à simbiose. Adicionalmente, a área nodular (AN) apresentou correlação positiva e significativa com a massa específica de nódulos (MEN) (0,72 **), evidenciando que nódulos com maior expansão dimensional tendem a apresentar maior acúmulo de material seca individual, refletindo maior desenvolvimento estrutural. Em conjunto, esses achados indicam que os componentes quantitativos e dimensionais (tamanho e massa individual) da nodulação contribuem de maneira integrada para a expressão do potencial simbiótico dos genótipos, demonstrando que tanto a intensidade de formação quanto o grau de desenvolvimento dos nódulos são determinantes na caracterização da eficiência nodular sob FBN.

Esses resultados estão em consonância com Costa et al. (2025b), que demonstraram correlações consistentes entre a massa seca de nódulos com a eficiência da fixação de nitrogênio, indicando que caracteres de nodulação e indicadores fisiológicos estão diretamente associados ao desempenho simbiótico das plantas. De forma complementar, Reinprecht et al. (2020b), evidenciaram que a aplicação de nitrogênio mineral afeta a FBN de maneira dependente do genótipo, sendo que alguns materiais mantêm simultaneamente elevados níveis de fixação biológica de nitrogênio e adequado desempenho agrônomico. Esses resultados reforçam a existência de associações favoráveis entre caracteres de nodulação e atributos agrônomicos, corroborando as correlações positivas observadas no presente estudo.

Adicionalmente, Barron et al. (1999) relataram que a seleção recorrente promove incrementos no rendimento de grãos, na produção de biomassa e no acúmulo total de nitrogênio, os quais refletem correlações positivas entre caracteres de crescimento vegetal, nodulação e eficiência no uso de nitrogênio. Embora o ciclo de desenvolvimento possa influenciar a magnitude dessas associações, a resposta conjunta desses caracteres ao longo dos ciclos de seleção indica interdependência entre nodulação, acúmulo de biomassa e eficiência fisiológica. Dessa forma, os achados deste estudo corroboram a importância de considerar as correlações entre caracteres de nodulação, indicadores fisiológicos e atributos agrônomicos em programas de melhoramento de feijão preto, visando a seleção de genótipos com maior eficiência em fixação biológica de nitrogênio e adequado desempenho produtivo.

5. CONCLUSÕES

- i. Existe variabilidade genética expressiva entre as linhagens de feijão-comum preto para produtividade, qualidade de grãos e eficiência na fixação biológica de nitrogênio (FBN)
- ii. As linhagens CNFP 21675, CNFP 21685, CNFP 21660, CNFP 21673 e CNFP 21629 destacaram-se sob condições de FBN e são recomendadas para avanço em ensaios de Valor de Cultivo e Uso (VCU) em sistemas baseados em FBN.
- iii. As linhagens CNFP 21675, CNFP 21649, CNFP 21640, CNFP 21619 e CNFP 21617 apresentam elevado potencial nodulatório e podem ser recomendadas como genitores para incrementar caracteres associados à FBN em programas de melhoramento.
- iv. A linhagem CNFP 21675 destacou-se ao nitrogênio derivado da atmosfera (%NDFA) e ao potencial nodulatório, sendo indicada como genitor para programas de melhoramento focados em FBN.

6. REFERÊNCIAS

ACOSTA-GALLEGOS, J. A.; KELLY, J. D.; GEPTS, P. Prebreeding in common bean and use of genetic diversity from wild germplasm. **Crop Science**, vol. 47, n° SUPPL. DEC., 2007. <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.04.0008IPBS>.

ABU, G. K.; ADETIMIRIN, V. O.; FATOKUN, C.; KENENI, G.; ASSEFA, F. Genotypic variation in nitrogen fixation characteristics in faba bean (*Vicia faba* L.) under contrasting phosphorus fertilizer regimes. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v. 7, n. 4, 2024. DOI: 10.1002/agg2.70009.

ALBUQUERQUE, H. C.; PEGORARO, R. F.; VIEIRA, N. M. B.; AMORIM, I. J. F.; KONDO, M. K. Capacidade nodulatória e características agronômicas de feijoeiros comuns submetidos à adubação molíbdica parcelada e nitrogenada. **Revista Ciência Agronômica**, vol. 43, n° 2, p. 214–221, 2012. <https://doi.org/10.1590/s1806-66902012000200002>

ALBUQUERQUE, J. R. T.; LINS, H. A.; DOS SANTOS, M. G.; DE FREITAS, M. A. M.; DA SILVEIRA, L. M.; DE SOUSA NUNES, G. H.; BARROS, A. P.; JORGE VIEIRA, P. F. de M. Environmental variables in the G x E interaction in soybean in the semiarid. **Revista Ciencia Agronomica**, vol. 54, 2023. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20230019>.

ALMEIDA CAMPINAS, C. de P. Instituto Agronômico Pós-Graduação Genômica Populacional, **Seleção Assistida E Mapeamento Genético Para Resistência À Mancha Angular E Antracnose Em Feijão Carioca**. 2021.

AMBRÓSIO, M.; DAHER, R. F.; SANTOS, R. M.; SANTANA, G. S.; J.; VIDAL, K. F.; A.; NASCIMENTO, M. R.; LEITE, C. L.; SOUZA, A. G.; FREITAS, R. S.; STIDA, W. F.; FARIAS, J. E. C.; SOUZA FILHO, B. F.; MELO, L. C.; SANTOS, P. R. Adaptability and stability of black bean genotypes with normal and early cycle. **Euphytica**, vol. 1, p. 22, 2024. DOI: 10.1007/s10681-023-03282-2. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10681-023-03282-2>. Acessado: 1 out. 2025.

ARAÚJO, A. P.; TEIXEIRA, M. G. Relationships between grain yield and accumulation of biomass, nitrogen and phosphorus in common bean cultivars. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [N.p.], vol. 32, nº 5, p. 1977–1986, 2008. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832008000500019>.

AGUIAR, M. S.; PEREIRA H. S.; SOUZA, T. P. O.; FARIA, L. C.; COSTA, J. G. C.; TORGA, P. P.; GUIMARÃES, C. M.; SOUZA FILHO, E. F.; ALMEIDA, V. M.; MELO, L. C. **View of BRS FP417: BLACK COMMON BEAN CULTIVAR WITH HIGH YIELD, HIGH COMMERCIAL-QUALITY GRAIN, AND DISEASE RESISTANCE**. 2023. Disponível em: <http://fpbjournal.com/fpbj/index.php/fpbj/article/view/198/86>. Acessado: 29 nov. 2025.

BEATRIZ, A.; TERRA, C.; FLORENTINO, L. A.; DE REZENDE, A. V.; SILVA, N. C. D. E. Leguminosas forrageiras na recuperação de pastagens no Brasil Forage legumes in pasture recovery in Brazil. **Revista de Ciências Agrárias**, [N.p.], vol. 42, nº 2, p. 305–313, 2019. DOI: 10.19084/rca.16016. Disponível em: <https://doi.org/10.19084/rca.16016>.

BEUTINGER C, S.; MELO, L. C.; SOUZA, T. L. P. O.; PEREIRA, H. S. Genetic parameters and selection of carioca common bean lines resistant to fusarium wilt Parâmetros genéticos e seleção de linhagens de feijão-carioca resistentes à murcha-de-fusário. **Pesq. agropec. bras**, vol. 58, p. 2023, 2023. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2023.v58.03313>. Acessado: 7 jan. 2026.

BEVILAQUA, G. P. A.; ANTUNES, I. F.; EDERHARDT, P. E. R.; EICHHOLZ, C. J.; GREHS, R. C. **Indicações técnicas para produção de sementes de feijão para a agricultura familiar**. Embrapa Clima Temperado, p. 16, 2013.

BODDEY, R. M.; PEOPLES, M. B.; PALMER, B.; DART, P. J. Use of the 15 N natural abundance technique to quantify biological nitrogen fixation by woody perennials. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, vol. 57, p. 235–270, 2000. Acessado: 13 out. 2025.

MARINA B, O, S; ABNER J, C; ANDRÉIA M, S, S, D; IGNACIO A; ÉRIKA E A; JOSÉ E, S, C; O, G, B; ANDREY A, S. Qualidade tecnológica de grãos de genótipos selecionados de feijão-comum da classe comercial preta. **Agrária - Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. 14, n. 3, p. 1-8, 2019. DOI: 10.5039/agraria. v14i3a5660. Disponível em: <http://www.agraria.pro.br/ojs32/index.php/RBCA/article/view/v14i3a5660>. Acesso em: 25 fev. 2026.

BUETOW, R.; MEHRING, G. H.; KANDEL, H.; JOHNSON, B.; OSORNO, J. M. Nitrogen Fertilization and Inoculation Effects on Dry Bean. **Agricultural Sciences**, vol. 08, n° 10, p. 1065–1081, 2017. <https://doi.org/10.4236/as.2017.810077>.

BUENO, A. M.; FLORES, R. A.; ANDRADE, A. F.; LIMA, F. R. S.; PESSOA-DE-SOUZA, M. A.; ALVES JÚNIOR, J.; MESQUITA, M.; FERREIRA, E. P. B. vol. 10, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i4.14399. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i4.14399>. Acessado: 16 out. 2025.

CASTRO PIAS, O. H.; WELTER, C. A.; TIECHER, T.; CHERUBIN, M. R.; FLORES, J. P. M.; ALVES, L. A.; BAYER, C. Common bean yield responses to nitrogen fertilization in Brazilian no-till soils: A meta-analysis. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, vol. 46, p. 1–28, 2022. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20220022>.

CAPELESSO, D.; COSTA, A. C. T. da; JÚNIOR, J. B. D. Nitrogen Fertilization and Inoculation of Seeds with *Rhizobium tropici* on the Agronomic Performance of Common Beans. **Journal of Experimental Agriculture International**, vol. 40, n° 1, p. 1–9, 2019. <https://doi.org/10.9734/jeai/2019/v40i130354>.

CARDOSO, J. D.; GOMES, D. F.; GOES, K. C. G. P.; FONSECA, N. S.; DORIGO, O. F.; HUNGRIA, M.; ANDRADE, D. S. Relationship between total nodulation and nodulation at the root crown of peanut, soybean and common bean plants. **Soil Biology and Biochemistry**, vol. 41, n° 8, p. 1760–1763, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.05.008>.

CHOI, S. J.; LEE, Z.; JEONG, E.; KIM, S.; SEO, J. S.; UM, T.; SHIM, J. S. Signaling pathways underlying nitrogen transport and metabolism in plants. **BMB Reports**, [N.p.], vol. 56, n° 2, p. 56–64, 2023. <https://doi.org/10.5483/BMBRep.2022-0178>.

COSTA, N. V.; MELO, P. G. S.; PEREIRA, H. S.; DE BRITO FERREIRA, E. P.; KNUPP, A. M.; MELO, L. C. Combining ability of black common bean developed under a biological nitrogen fixation system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, vol. 60, p. e03926, 2025. DOI: 10.1590/S1678-3921.PAB2025.V60.03926. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/sY9rZvNXWfZfphNGpg8PbCp/?lang=en>. Acessado: 14 set. 2025.

CARBONELL, S. A. M.; CHIORATO, A. F.; BEZERRA, L. M. C.; ESTEVES, J. A. F.; GONÇALVES, J. G. R.; SILVA, D. A.; ROVARIS, S. R. S.; SPITTI, A. M. D. S.; BENCHIMOL-REIS, L. L.; CARVALHO, C. R. L.; BARROS, V. L. N. P.; FREITAS, R. S.; TICELLI, M.; GALLO, P. B. Tamanho de grão comercial em cultivares de feijoeiro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 10, p. 2067-2073, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/LkTBS6NBBCXLxXQ8RmrWmLr/?lang=pt>. Acesso em: 25 fev. 2026.

COSTA, N. V.; MELO, P. G. S.; PEREIRA, H. S.; DE SOUSA, R. G.; FERREIRA, E. P. de B.; KNUPP, A. M.; MELO, L. C. Genetic parameters and indirect selection of elite lines for efficiency in symbiotic nitrogen fixation in black common bean. **Crop Science**, vol. 65, nº 4, 1 jul. 2025a. <https://doi.org/10.1002/csc2.70112>.

CRUZ, C. D. GENES - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics - doi: 10.4025/actasciagron.v35i3.21251. Acta Scientiarum. Agronomy, vol. 35, nº 3, p. 271–276, 1 jul. 2013. DOI: 10.4025/actasciagron.v35i3.21251. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/21251>. Acessado: 15 set. 2025.

CUNHA, P. C. R.; SILVEIRA, P. M.; XIMENES, P. A.; SOUSA, R. D. F.; ALVES JÚNIOR, J.; NASCIMENTO, J. L. do. Fontes, Formas De Aplicação E Doses De Nitrogênio Em Feijoeiro Irrigado Sob Plantio Direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [vol. 41, nº 1, p. 80–86, 2011. <https://doi.org/10.5216/pat.v41i1.7515>.

DE FÁTIMA MILCHESKI, V.; SENFF, S. E.; ORSI, N.; BOTELHO, G. R.; DA COSTA LARA FIOREZE, A. C. Influence of common bean genotypes and rhizobia interaction for nodulation and nitrogen fixation. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, vol. 21, nº 1, p. 8–15, 2022. <https://doi.org/10.5965/223811712112022008>.

DEL, M.; CUADROS, R. L.; HOSPITAL, N.; JOSÉ, S.; NACIONAL, P.; PERÚ, D.; YUNGAY 526-A, J.; LIMA PERÚ, M.; CARRIÓN, J. G. Performance of “ñuña” seeds *Phaseolus vulgaris* L. (Fabaceae) due to the biological fixation of atmospheric nitrogen with *Rhizobium phaseoli*. *Arnaldoa*, vol. 23, nº 1, p. 247–270, 2016. Acessado: 17 set. 2025.

DEON, M.; DE RESENDE, V.; DUARTE, J. B. **PRECISÃO E CONTROLE DE QUALIDADE EM EXPERIMENTOS DE AVALIAÇÃO DE CULTIVARES 1.** [N.p.]: [N.p.], [[S.d.]]. 182–194 p. Disponível em: www.agro.ufg.br/pat.

DIAS, P A S; MELO, P. G. S.; MELO, L. C.; SOUZA, T. L. P. O.; FARIA, L. C.; FERREIRA, E. P. B.; PEREIRA, H. S. **Production and disease resistance of elite black bean lines previously selected using mineral nitrogen fertilization cultivated with natural versus artificial nitrogen supplementation.** 2020. DOI: 10.4238/gmr18491. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4238/gmr18491>. Acessado: 30 ago. 2025.

DIAS, P. A. S.; MELO, P. G. S.; FERREIRA, E. P. de B.; MELO, L. C.; SOUZA, T. L. P. O. de; FARIA, L. C. de; ALMEIDA, V. M. de; PEREIRA, H. S. **Nitrogen sources on agronomic traits in carioca common bean lines developed under mineral nitrogen fertilization.** *Bragantia*, vol. 83, 2024. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20230285>.

DIAS, P. A. S.; MELO, P. G. S.; PEREIRA, H. S.; DE BRITO FERREIRA, E. P. Automated And Estimation Methods To Count Nodule Number In Common Bean. *Australian Journal of Crop Science*, [N.p.], vol. 11, nº 8, p. 968–973, 2017. <https://doi.org/10.21475/AJCS.17.11.08.PNE452>.

DUARTE, J. B.; VENCOSKY, R. **INTERAÇÃO GENÓTIPOS X AMBIENTES UMA INTRODUÇÃO À ANÁLISE "AMMI".** [N.p.], 1999. Acessado: 27 nov. 2025.

ELIZONDO BARRON, J.; PASINI, R. J.; DAVIS, D. W.; STUTHMAN, D. D.; GRAHAM, P. H. Response to selection for seed yield and nitrogen (N₂) fixation in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Field Crops Research*, vol. 62, nº 2–3, p. 119–128, 25 jun. 1999. DOI: 10.1016/S0378-4290(99)00009-X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037842909900009X>. Acessado: 16 jan. 2026.

EMBAPA. **Socioeconomia para Arroz e Feijão.** 2025. Disponível em: <https://www.cnpaf.embrapa.br/socioeconomia/index.htm>. Acessado: 14 out. 2025.

EMBRAPA ARROZ E FEIJÃO. **Dados conjunturais da produção, produtividade e área do feijão comum** (*Phaseolus vulgaris* L.) e **caupi** (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) **no Brasil (1985**

- 2024). Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão. 2025. Disponível em: <<https://www.cnpaf.embrapa.br/socioeconomia/index.htm>>. Acesso em: 27 jan. 2024.

FAGERIA, N. K.; FERREIRA, E. P. B.; MELO, L. C.; KNUPP, A. M. Genotypic differences in dry bean yield and yield components as influenced by nitrogen fertilization and rhizobia. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Nova Iorque, v. 45, n. 12, p. 1583–1604, 2014

FARIA, A. P.; MODA-CIRINO, V.; BURATTO, J. S.; DA SILVA, C. F. B.; DESTRO, D. Interação genótipo x ambiente na produtividade de grãos de linhagens e cultivares de feijão - DOI: 10.4025/actasciagron.v31i4.850. **Acta Scientiarum. Agronomy**, [N.p.], vol. 31, n° 4, p. 579–585, 28 ago. 2009. DOI: 10.4025/actasciagron.v31i4.850. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/850>. Acessado: 13 out. 2025.

FARID, M.; EARL, H. J.; NAVABI, A. Yield stability of dry bean genotypes across nitrogen-fixation-dependent and fertilizer-dependent management systems. **Crop Science**, vol. 56, n° 1, p. 173–182, 1 jan. 2016. DOI: 10.2135/CROPSCI2015.06.0343;CTYPE:STRING:JOURNAL. Disponível em: [/doi/pdf/10.2135/cropsci2015.06.0343](https://doi.org/10.2135/cropsci2015.06.0343). Acessado: 25 dez. 2025.

FARID, M.; NAVABI, A. N₂ fixation ability of different dry bean genotypes. **Canadian Journal of Plant Science**, vol. 95, n° 6, p. 1243–1257, 2015. <https://doi.org/10.4141/CJPS-2015-084>.

FERREIRA, Amanda Lopes; WANDER, Alcido Elenor; PINHEIRO, Patricia Valle. *IPM Adoption in Common Beans in Brazil*. **Horticulturae**, Basel, v. 11, n. 6, p. 611, 2025. DOI: 10.3390/horticulturae11060611. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2311-7524/11/6/611>. Acesso em: 23 fev. 2026.

FENTA, B. A.; BEEBE, S. E.; RAO, I. M.; KUNERT, K. J. Association of nodule performance traits with shoot performance traits of common bean under drought stress. **Journal of Crop Improvement**, v. 28, n. 3, p. 418–435, 2014. DOI: 10.1080/15427528.2014.910287.

FLAMMER, C.; IOANNOU, I. **Estudo granulométrico do resíduo da palha de feijão para efeito benéfico no processo de obtenção do bioetanol**. Brigham Young University, vol. 1, n° 69, p. 5–24, 2015.

FONSECA, D. L.; VIVAS QUILA, N. J.; LÓPEZ, H. E. B. Técnicas aplicadas en la investigación agrícola para cuantificar la fijación de nitrógeno: una revisión sistemática TT - Techniques applied in agricultural research to quantify nitrogen fixation: a systematic review. **Ciencia y Tecnología Agropecuaria**, vol. 21, n° 1, p. 32–50, 2019.

FONSECA, G. G.; OLIVEIRA, D. P.; SOARES, B. L.; FERREIRA, P. A. A.; TEIXEIRA, C. M.; MARTINS, F. A. D.; MOREIRA, F. M. S.; ANDRADE, M. J. B. Resposta de cultivares de feijoeiro-comum à inoculação das sementes com duas estirpes de rizóbio. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 6, p. 1778-1787, 2013.

GAO, J. P.; LIANG, W.; JIANG, S.; YAN, Z.; ZHOU, C.; WANG, E.; MURRAY, J. D. NODULE INCEPTION activates gibberellin biosynthesis genes during rhizobial infection. **New Phytologist**, vol. 239, n° 2, p. 459–465, 2023. <https://doi.org/10.1111/nph.18759>.

GARCIA, P. L.; SERMARINI, R. A.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen fertilization management with blends of controlled-release and conventional urea affects common bean growth and yield during mild winters in Brazil. **Agronomy**, vol. 10, n° 12, p. 1–17, 2020. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121935>.

GEBREMEDHIN, W. **Summary Note on Nitrogen Fixation, Legume Nodulation and Abiotic Factors Affecting Biological Nitrogen Fixation Inside the Soil**. vol. 55, p. 55–60, 2018.

GOLPARVAR, R. **Multivariate analysis and determination of the best indirect selection criteria to genetic improvement of biological nitrogen fixation ability in common bean genotypes**. 2022. Disponível em: <https://doiserbia.nb.rs/Article.aspx?id=0534-00121202279G>. Acesso em: Acesso em: jan. 2026.

GÓMEZ, L. A., Hernández, G., Sánchez, T., Toscano, V., & Sánchez, M. (1998). Interacción genotipo de frijol común-cepa de Rhizobium. **Agronomía Mesoamericana**, 93-97.

GUO, K.; YANG, J.; YU, N.; LUO, L.; WANG, E. Biological nitrogen fixation in cereal crops: Progress, strategies, and perspectives. **Plant Communications**, vol. 4, n° 2, p. 100499, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2022.100499>.

HASDIANA, U. AVALIAÇÃO DA DEFICIÊNCIA DE NITROGÊNIO NO FEIJOEIRO USANDO UM MEDIDOR PORTÁTIL DE CLOROFILA. **Analytical Biochemistry**, vol. 11, nº 1, p. 1–5, 2018.

HEILIG, J. A.; BEAVER, J. S.; WRIGHT, E. M.; SONG, Q.; KELLY, J. D. QTL analysis of symbiotic nitrogen fixation in a black bean population. **Crop Science**, vol. 57, nº 1, p. 118–129, 2017. <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.05.0348>.

HERRIDGE, D. F.; HARDARSON, G.; BROUGHTON, W. J. *Breeding for traits supportive of nitrogen fixation in legumes*. Canberra: ACIAR, 2003. Disponível em: <https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=9kQWjU2Vt8gC>. Acesso em: jan. 2026.

HERRIDGE, D. F.; DANSO, S. K. A. Enhancing crop legume N₂ fixation through selection and breeding. *Plant and Soil*, v. 174, n. 1, p. 51–82, 1995. DOI: 10.1007/978-94-011-0053-3_3.

HOTHEM, S. D.; MARLEY, K. A.; LARSON, R. A. **Photochemistry in Hoagland's nutrient solution**. **Journal of Plant Nutrition**, vol. 26, nº 4, p. 845–854, 2003. DOI: 10.1081/PLN-120018569. Disponível em: </doi/pdf/10.1081/PLN-120018569?download=true>. Acessado: 16 set. 2025.

KABANGE, N. R.; LEE, S. M.; SHIN, D.; LEE, J. Y.; KWON, Y.; KANG, J. W.; CHA, J. K.; PARK, H.; ALIBU, S.; LEE, J. H. **Multiple Facets of Nitrogen: From Atmospheric Gas to Indispensable Agricultural Input**. *Life*, vol. 12, nº 8, 2022. <https://doi.org/10.3390/life12081272>.

KLEIN, L. A.; MARCHIORO, V. S.; TOEBE, M.; OLIVOTO, T.; MEIRA, D.; MEIER, C.; BENIN, G.; BUSATTO, C. A.; GARAFINI, D. C.; ALBERTI, J. V.; FINATTO, J. L. B. Selection of superior black oat lines using the MGIDI index Selection of superior black oat lines using the MGIDI index ARTICLE. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, vol. 23, nº 3, p. 45112332, 2023. DOI: 10.1590/1984. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1984-70332023v23n3a25>. Acessado: 18 jan. 2026.

KAMFWA, K.; ZHAO, D.; KELLY, J. D.; CICHY, K. A. **Transcriptome analysis of two recombinant inbred lines of common bean contrasting for symbiotic nitrogen fixation**. *PLoS ONE*, vol. 12, nº 2, 2017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172141>.

KAMALUDDIN; AHMED, S. Variability, correlation and path analysis for seed yield and yield related traits in common beans. **Indian Journal of Horticulture**, v. 68, n. 1, p. 61–65, 2011. Disponível em: <https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:ijh&volume=68&issue=1&article=012>

KARAVIDAS, I.; NTATSI, G.; NTANASI, T.; TAMPAKAKI, A.; GIANNOPOULOU, A.; PANTAZOPOULOU, D.; SABATINO, L.; IANNETTA, P. P. M.; SAVVAS, D. **Hydroponic Common-Bean Performance under Reduced N-Supply Level and Rhizobia Application**. **Plants**, vol. 12, n° 3, p. 1–17, 2023. <https://doi.org/10.3390/plants12030646>.

KETEMA, W.; GELETA, N. Studies on Genetic Variability of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Varieties for Yield and Yield Related Traits in Western Ethiopia. **International Journal of Applied Agricultural Sciences** 2022, Volume 8, Page 41, [N.p.], vol. 8, n° 1, p. 41–49, 28 jan. 2022. DOI: 10.11648/J.IJAAS.20220801.15. Disponível em: <https://www.sciencepg.com/article/10.11648/j.ijaas.20220801.15>. Acessado: 28 dez. 2025.

LENTH R. V.; PIASKOWSKI J.; BANFAI B.; BOLKER B.; BUERKNER P.; VÁZQUEZ I. G.; HERVÉ M.; JUNG M.; LOVE J.; MIGUEZ F.; RIEB H.; SINGMANN H. **Package “emmeans” Type Package Title Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means**. 2025. <https://doi.org/10.1080/00031305.1980.10483031>. Acessado: 16 jan. 2026.

LI, X.; ZHU, B.; LI, S.; LIU, L.; SONG, K.; LIU, J. A Comprehensive Review of Crop Chlorophyll Mapping Using Remote Sensing Approaches: **Achievements, Limitations, and Future Perspectives**. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), vol. 25, n° 8, 1 abr. 2025. <https://doi.org/10.3390/s25082345>.

MARTINEZ-ROMERO, E.; SEGOVIA, L.; MERCANTE, F. M.; FRANCO, A. A.; GRAHAM, P.; PARDO, M. A. Rhizobium tropici, a novel species nodulating Phaseolus vulgaris L. beans and Leucaena sp. trees. **International Journal of Systematic Bacteriology**, vol. 41, n° 3, p. 417–426, 1991. <https://doi.org/10.1099/00207713-41-3-417>.

MEDEIROS, M.; BRITO, P.; MURAOKA, T.; CABRAL, E. **Fertilizante Nitrogenado E Nitrogênio Do Solo No Desenvolvimento De Feijão E Caupi**. Bragantia, vol. 70, n° 1, p. 206–215, 2010.

MEDEIROS, P. M.; LADIO, A. H.; ALBUQUERQUE, U. P. **Sampling problems in Brazilian research: a critical evaluation of studies on medicinal plants.** Revista Brasileira de Farmacognosia, [N.p.], vol. 24, n° 2, p. 103–109, 2014. DOI: 10.1016/J.BJP.2014.01.010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbfar/a/s6LBWP7s7m5FmrF4gFB5g9H/?format=html&lang=en>. Acessado: 2 set. 2025.

MELO, S. R.; SILVA NETO, M. L.; ZILLI, J. E. **Resposta de cultivares de feijão-caupi à fixação biológica de nitrogênio.** 2009. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/696581>. Acessado: 16 jan. 2026.

MENEGOL, D. R.; DE CASTRO PIAS, O. H.; SANTI, A. L.; CHERUBIN, M. R.; BERGHETTI, J.; SIMON, D. H. Índice De Suficiência De Clorofila No Manejo Da Adubação Nitrogenada Do Feijoeiro Comum. **Revista Agro@Mambiente on-Line**, vol. 9, n° 2, p. 119, 2015. <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v9i2.2259>.

MESSIAS, M.; ASOBIA, P. C.; DE BRITO FERREIRA, E. P. Economic analysis of rhizobia and azospirilla co-inoculation in common beans. **Bulletin of the National Research Centre**, vol. 47, n° 1, 2023. <https://doi.org/10.1186/s42269-023-01149-z>.

MICHIELS, J.; DOMBRECHT, B.; VERMEIREN, N.; XI, C.; LUYTEN, E.; VANDERLEYDEN, J. Phaseolus vulgaris is a non-selective host for nodulation. **FEMS Microbiology Ecology**, vol. 26, n° 3, p. 193–205, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0168-6496\(98\)00035-X](https://doi.org/10.1016/S0168-6496(98)00035-X).

NAMAYANJA, S. T.; NAMUSOKE, A.; MUKABARAN-GA, A.; SHAKIRAH, J.; NKUBOYE, N.; GEPTS, A.; JEBESA, P. T. Agronomic Performance, Stability Analysis and Evaluation of Anthracnose Disease Resistance of Common Bean Lines Derived by Marker-Assisted Backcrossing in Uganda. **Agricultural Sciences**, vol. 15, p. 376–397, 2021. DOI: 10.4236/as.2024.153022. Disponível em: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>. Acessado: 16 out. 2025.

Oladzad, A., González, A., Macchiavelli, R., de Jensen, C. E., Beaver, J., Porch, T., & McClean, P. (2020). Genetic factors associated with nodulation and nitrogen derived from atmosphere in a middle American common bean panel. **Frontiers in Plant Science**, 11, 576078.

OLIVEIRA DA SILVA ALASSE. Nodulação da Soja 2024 | **Agroadvance**. 2 out. 2024. Disponível em: https://agroadvance.com.br/blog-nodulacao-da-soja/?utm_source=chatgpt.com. Acessado: 16 jan. 2026.

OLIVEIRA, J. T. D.; RIBEIRO, I. D. S.; ROQUE, C. G.; MONTANARI, R.; GAVA, R.; TEODORO, P. E. Contribution of morphological traits for grain yield in common bean. *Bioscience Journal*, v. 34, p. 351–356, 2018.

OLIVOTO, T. Lights, camera, pliman! An R package for plant image analysis. **Methods in Ecology and Evolution**, [N.p.], vol. 13, n° 4, p. 789–798, 1 abr. 2022. DOI: 10.1111/2041-210X.13803. Disponível em: https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/2041-210X.13803?getft_integrator=mendeley&utm_source=mendeley. Acessado: 16 set. 2025.

OLIVOTO, T.; LÚCIO, A. D. C. metan: An R package for multi-environment trial analysis. **Methods in Ecology and Evolution**, vol. 11, n° 6, p. 783–789, 1 jun. 2020. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13384>. Acessado: 16 jan. 2026.

OLIVOTO, T.; LÚCIO, A. D. C.; DA SILVA, J. A. G.; MARCHIORO, V. S.; DE SOUZA, V. Q.; JOST, E. Mean Performance and Stability in Multi-Environment Trials I: Combining Features of AMMI and BLUP Techniques. *Agronomy Journal*, vol. 111, n° 6, p. 2949–2960, 1 nov. 2019. DOI: 10.2134/AGRONJ2019.03.0220. Disponível em: [/doi/pdf/10.2134/agronj2019.03.0220](https://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0220). Acessado: 13 out. 2025.

OLIVOTO, T.; LÚCIO, A. D. C.; DA SILVA, J. A. G.; SARI, B. G.; DIEL, M. I. Mean performance and stability in multi-environment trials II: Selection based on multiple traits. **Agronomy Journal**, vol. 111, n° 6, p. 2961–2969, 1 nov. 2019. <https://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0221>.

OLIVOTO, T.; NARDINO, M. MGIDI: toward an effective multivariate selection in biological experiments. **Bioinformatics**, [vol. 37, n° 10, p. 1383–1389, 16 jun. 2021. DOI:

10.1093/BIOINFORMATICS/BTAA981. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1093/bioinformatics/btaa981>. Acessado: 14 jan. 2026.

OLIVOTO T.; SARI, B. G. **Capítulo 14 Interação genótipo-vs-ambiente** | Software R para avaliação de dados experimentais. 2021. Disponível em: https://tiagoolivoto.github.io/e-bookr/interaction.html?utm_source=chatgpt.com. Acessado: 1 set. 2025.

OLIVEIRA, A. P. S.; SOUSA, C. M.; FERREIRA, E. P. B.; OLIVEIRA, A. P. S. **Revista Caatinga Mossoró**, v. 30, n. 3. p. 642–652, 2017. DOI: 10.1590/1983-21252017v30n312rc. Disponível em: <http://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/sistema>. Acessado: 14 out. 2025.

PACHECO, R. S.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J.; FERREIRA, E. P. B.; STRALIOTTO, R.; ARAÚJO, A. P. **Differences in contribution of biological nitrogen fixation to yield performance of common bean cultivars as assessed by the 15N natural abundance technique**. 2020. DOI: 10.1007/s11104-020-04654-6. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04654-6>. Acessado: 16 jan. 2026.

PACHECO, R. S.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R.; STRALIOTTO, R.; ARAÚJO, A. P. **Growth patterns of common bean cultivars affect the “B” value required to quantify biological N₂ fixation using the 15 N natural abundance technique**. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3331-9>. Acessado: 16 set. 2025.

PAYÁ-TORMO, L.; COROIAN, D.; MARTÍN-MUÑOZ, S.; BADALYAN, A.; GREEN, R. T.; VELDHUIZEN, M.; JIANG, X.; LÓPEZ-TORREJÓN, G.; BALK, J.; SEEFELDT, L. C.; BURÉN, S.; RUBIO, L. M. A colorimetric method to measure in vitro nitrogenase functionality for engineering nitrogen fixation. **Scientific Reports**, vol. 12, nº 1, p. 1–12, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14453-x>.

PELEGRIN, R. de; MERCANTE, F. M.; OTSUBO, I. M. N.; OTSUBO, A. A. Resposta da cultura do feijoeiro à adubação nitrogenada e à inoculação com rizóbio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 33, nº 1, p. 219–226, 2009. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832009000100023>.

PEREIRA, H. S.; MELO, L. C.; DE FARIA, L. C.; FERREIRA, E. P. de B.; MERCANTE, F. M.; WENDLAND, A.; DE SOUZA, T. L. P. O. Common bean elite lines cultivated under

nitrogen fertilization and inoculation with *Rhizobium tropici*. **Ciência Rural**, vol. 45, nº 12, p. 2168–2173, 1 dez. 2015b. DOI: 10.1590/0103-8478CR20141135. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/Q5kvxkGP7QYTbmWLSS5Wnsf/?format=html&lang=en>. Acessado: 30 ago. 2025.

PEREIRA, H. S.; ALVARES, R. C.; SILVA, F. C.; FARIA, L. C.; MELO, L. C. Genetic, environmental and genotype × environment interaction effects on the common bean grain yield and commercial quality. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 38, n. 3, p. 1241–1250, 2017. DOI: 10.5433/1679-0359.2017V38N3P1241.

PEREIRA, H. S.; MELO, L. C.; FARIA, L. C. D.; DEL PELOSO, M. J.; COSTA, J. G. C. D.; 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.

PEREIRA, T. C. V.; SCHMIT, R.; HAVEROTH, E. J.; DE MELO, R. C.; COIMBRA, J. L. M.; GUIDOLIN, A. F.; BACKES, R. L. Reflexo da interação genótipo x ambiente sobre o melhoramento genético de feijão. **Ciência Rural**, vol. 46, nº 3, p. 411–417, 1 mar. 2016. DOI: 10.1590/0103-8478CR20130998. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/JTsQdxMpCVB6JQCBpVjv8qz/?format=html&lang=pt>. Acessado: 7 out. 2025.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. 2025. Disponível em: <https://www.gnu.org/copyleft/gpl.html>. Acessado: 16 jan. 2026.

R: THE R PROJECT FOR STATISTICAL COMPUTING. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acessado: 15 set. 2025.

RAHMAWATI, A. B.; BOWO, S.; SANTOSA, S. Development of a science process skills-based interactive website ‘bioenial’ on environmental pollution material. **Biosfer**, vol. 15, nº 2, p. 263–279, 2022. <https://doi.org/10.21009/biosferjpb.25347>.

RAJPUT, L. S.; NATARAJ, V.; KUMAR, S.; AMRATE, P. K.; JAHAGIRDAR, S.; HUILGOL, S. N.; CHAKRUNO, P.; SINGH, A.; MARANNA, S.; RATNAPARKHE, M. B.; BORAH, M.; SINGH, K. P.; GUPTA, S.; KHANDEKAR, N. WAASB index revealed stable

resistance sources for soybean anthracnose in India. **The Journal of Agricultural Science**, vol. 159, n° 9–10, p. 710–720, 22 nov. 2021. DOI: 10.1017/S0021859622000016. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-agricultural-science/article/abs/waasb-index-revealed-stable-resistance-sources-for-soybean-anthracnose-in-india/C4E4B902CAB9C7F9F82E44D113C33D99>. Acessado: 7 jan. 2026.

RODIÑO, A. P.; DE LA FUENTE, M.; DE RON, A. M.; LEMA, M. J.; DREVON, J. J.; SANTALLA, M. Variation for nodulation and plant yield of common bean genotypes and environmental effects on the genotype expression. **Plant Soil**, vol. 346, p. 349–361, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0823-x>. Acessado: 16 jan. 2026.

REINPRECHT, Y.; SCHRAM, L.; MARSOLAIS, F.; SMITH, T. H.; HILL, B.; PAULS, K. P. Effects of Nitrogen Application on Nitrogen Fixation in Common Bean Production. **Frontiers in plant science**, vol. 11, 6 ago. 2020a. DOI: 10.3389/FPLS.2020.01172. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32849727/>. Acessado: 20 dez. 2025.

RODRÍGUEZ, D.; BEAVER, J.; DE JENSEN, C. E.; PORCH, T. Identification of resistance sources of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) to angular leaf spot (*pseudocercospora griseola*). Revista **Facultad Nacional de Agronomía Medellín**, vol. 72, n° 2, p. 8785–8791, 2019. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v72n2.70238>.

SOUSA, W. S.; SORATTO, R. P.; PEIXOTO, D. S.; CAMPOS, T. S.; DA SILVA, M. B.; SOUZA, A. G. V.; TEIXEIRA, I. R.; GITARI, H. I. Effects of Rhizobium inoculum compared with mineral nitrogen fertilizer on nodulation and seed yield of common bean. A meta-analysis. **Agronomy for Sustainable Development**, [vol. 42, n° 3, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00784-6>.

SAMSONE, I.; ANDERSONE, U.; VIKMANE, M.; IEVIŅA, B.; PAKARNA, G.; IEVINSH, G. **Nondestructive methods in plant biology: an accurate measurement of chlorophyll content by a chlorophyll meter**. Acta Universitatis Latviensis, vol. 723, n° Oxborough 2004, p. 145–154, 2007.

SANTIS, F. P.; SALVADOR NETO, A.; CAVALCANTE, A. G.; FILLA, V. A.; MINGOTTE, F. L. C.; LEMOS, L. B. Componentes de produção, produtividade e atributos tecnológicos de cultivares de feijoeiro do grupo comercial carioca. **Colloquium Agrariae**, vol. 15, n° 6, p. 21–30, 2019. <https://doi.org/10.5747/ca.2019.v15.n6.a332>.

SILVA, M. L. P. da; MOEN, F. S.; LILES, M. R.; FENG, Y.; SANZ-SÁEZ, Á. The response to inoculation with PGPR plus orange peel amendment on soybean is cultivar and environment dependent. **Plants**, v. 11, n. 9, p. 1138, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11091138>.

SOARES, B. L.; FERREIRA, P. A. A.; RUFINI, M.; MARTINS, F. A. D.; OLIVEIRA, D. P.; REIS, R. P.; ANDRADE, M. J. B.; MOREIRA, F. M. S.; **Agronomic and Economic Efficiency of Common-Bean Inoculation with Rhizobia and Mineral Nitrogen Fertilization**. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20150235>. Acessado: 29 ago. 2025.

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.; SOUZA FILHO, B. F.; MELO, C. L. P.; COSTA, A. F.; ALMEIDA, V. M.; POSSE, S. C. P.; MELO, L. C. BRS FP403: high-yielding black-seeded common bean cultivar with superior grain quality and moderate resistance to fusarium wilt CULTIVAR RELEASE. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, vol. 19, p. 240–244, 2019. DOI: 10.1590/1984. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1984-70332019v19n2c34>. Acessado: 18 dez. 2025.

SÁNCHEZ LÓPEZ, D. B.; GÓMEZ-VARGAS, R. M.; GARRIDO RUBIANO, M. F.; BONILLA BUITRAGO, R. R. Inoculación con bacterias promotoras de crecimiento vegetal en tomate bajo condiciones de invernadero. **Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas**, vol. 3, n° 7, p. 1401–1415, 2018. <https://doi.org/10.29312/remexca.v3i7.1346>.

SANDOVAL, G. M. **El nitrógeno, elemento clave en el futuro de los sistemas de producción agropecuarios**. Program, vol. 3, p. 300–300, 2012.

SCHOBER, P.; SCHWARTE, L. A. Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. **Anesthesia and Analgesia**, vol. 126, n° 5, p. 1763–1768, 1 maio 2018. DOI: 10.1213/ANE.0000000000002864. Disponível em: https://journals.lww.com/anesthesia-analgesia/fulltext/2018/05000/correlation_coefficients__appropriate_use_and.50.aspx. Acessado: 16 set. 2025.

SCOTT, A. J.; KNOTT, M. **A Cluster Analysis Method for Grouping Means in the Analysis of Variance**. vol. 30, n° 3, p. 507–512, 1974. Disponível em: <http://www.jstor.org> URL: <http://www.jstor.org/stable/2529204> Accessed: 30/04/2008 15:58. Acessado: 11 set. 2025.

SHARMA, S.; SINGH, D. K. Temporal Variations in Diazotrophic Communities and nifH Transcripts Level Across the Agricultural and Fallow Land at Jaipur, Rajasthan, India. **Indian Journal of Microbiology**, vol. 57, n° 1, p. 92, 1 mar. 2016. DOI: 10.1007/S12088-016-0634-0. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5243255/>. Acessado: 9 jan. 2026.

SHIFREN, A. A Local Solution for a Global Problem: Technology-Forcing Municipal Ordinances to Promote Enhanced Efficiency Fertilizers. p. 146–175, 2021.

SIMÕES. **Gênero y Cambio Climático Gender and Climate Change**. n° 1, p. 12–26, 2011.

SILVA, F. C. Interação de genótipos com ambientes para qualidade de grãos carioca e caracteres agronômicos em feijoeiro-comum. 2015. 194 f. **Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas)** – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015

SILVA, F. de C.; MARTINS, S. M.; PEREIRA, H. S.; MELO, P. G. S.; MELO, L. C. Strategies for the selection of common bean lines for yield and commercial grain quality. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 58, p. e03403, 2023. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2023.v58.03403.

SINCLAIR, T. R.; VADEZ, V. The future of grain legumes in cropping systems. **Crop & Pasture Science**, vol. 63, n° 6, p. 501–512, 18 set. 2012. DOI: 10.1071/CP12128. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1071/CP12128>. Acessado: 20 dez. 2025.

SINGH, A.; SINGH, D. K.; SINGH, S. K.; SINGH, V. K.; KUMAR, A. Multivariate stability analysis to select elite rice (*Oryza sativa* L.) genotypes for grain yield, zinc and Iron. **Scientific Reports** 2025 15:1, vol. 15, n° 1, p. 39586-, 12 nov. 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-11748-7. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-11748-7>. Acessado: 7 jan. 2026.

SORATTO, R. P.; DE CARVALHO, M. A. C.; ARF, O. Teor de clorofila e produtividade do feijoeiro em razão da adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, vol. 39, n° 9, p. 895–901, 2004. DOI: 10.1590/S0100-204X2004000900009. Disponível em: https://www.scielo.br/j/pab/a/mJXXTzHD6gpYGrzqhFRS6tq/?lang=pt&utm_source=chatgpt.com. Acessado: 17 set. 2025.

SOUZA, J. da S.; MARTINS, A. F.; PEDROSA, L. M. Importância de bactérias fixadoras de nitrogênio no cultivo do feijão-caupi *vigna unguiculata* l. **walp.** *Scientific Electronic Archives*, vol. 14, nº 9, 2021. <https://doi.org/10.36560/14920211456>.

STRALIOTTO, R.; RUMJANEK, N. G. **BIODIVERSIDADE DO RIZÓBIO QUE NODULA O FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris* L.) E OS PRINCIPAIS FATORES QUE AFETAM A SIMBIOSE.** 1999. Acessado: 9 jan. 2026.

TAMAGNO, S.; SADRAS, V. O.; HAEGELE, J. W.; ARMSTRONG, P. R.; CIAMPITTI, I. A. Interplay between nitrogen fertilizer and biological nitrogen fixation in soybean: implications on seed yield and biomass allocation. *Scientific Reports*, v. 8, n. 1, p. 17502, 2018.

TEIXEIRA, I. R.; BORÉM, A.; BASTOS DE ANDRADE, M. J.; PAIVA, M.; GIÚDICE, D.; CECON, P. R. **Teores de clorofila em plantas de feijoeiros influenciadas pela adubação com manganês e zinco.** 2019. 147–152 p.

TORRES, M. H. R. M.; SOUZA, T. L. P.; MELO, L. C.; PEREIRA, H. S; ARROZ FEIJÃO, E.; GO-, R.; CAPIVARA, F.; RURAL, Z. Combining ability for resistance to Fusarium wilt and yield in black bean Capacidade combinatória para resistência à murcha-de-fusário e produtividade em feijão-preto. **Pesq. agropec. bras**, vol. 56, p. 2021, 2021. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.02591. Disponível em: www.scielo.br/pab. Acessado: 18 dez. 2025.

UNKOVICH, M.; HERRIDGE, D.; PEOPLES, M.; CADISCH, G.; BODDEY, B.; GILLER, K.; ALVES, B.; CHALK, P. **Measuring plant-associated nitrogen fixation in agricultural systems.** 2008. Disponível em: www.aciar.gov.au. Acessado: 20 dez. 2025.

UNKOVICH, M.; PATE, J. S.; LEFROY, E. C.; ARTHUR, D. J. Nitrogen isotope fractionation in the fodder tree legume tagasaste (*Chamaecytisus proliferus*) and assessment of N₂ fixation inputs in deep sandy soils of Western Australia. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 27, n. 10, p. 921–929, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1071/PP99201>.

VASCONCELOS, R. R.; LIMA, S. F.; CONTARDI, L. M.; ALVAREZ, R. C. F.; SIMON, C. A.; BRASIL, M. da S. View of **INOCULAÇÃO COM RIZÓBIO ASSOCIADO AO MANEJO DE NITROGÊNIO EM FEIJÃO COMUM**. 2018. Disponível em: <https://journal.unoeste.br/index.php/ca/article/view/2108/2127>. Acessado: 9 jan. 2026.

XAVIER, G. R. Documentos 197 **Relações entre a contribuição da fixação biológica de nitrogênio e. Ecologia**, 2009.

YAGI, R.; ANDRADE, D. S.; WAURECK, A.; GOMES, J. C. Nodulações e produtividades de grãos de feijoeiros diante da adubação nitrogenada ou da inoculação com rhizobium freirei. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, vol. 39, nº 6, p. 1661–1670, 2015. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140342>.

YE, J. Y.; TIAN, W. H.; JIN, C. W. Nitrogen in plants: from nutrition to the modulation of abiotic stress adaptation. **Stress Biology**, vol. 2, nº 1, p. 1–14, 2022. <https://doi.org/10.1007/s44154-021-00030-1>.

YURGEL, S. N.; MIKLAS, P. N.; PORTER, L. D. Genetic variation for symbiotic nitrogen fixation and its relationship with yield and root-associated microbiomes in common bean. **Plant and Soil**, 2025. DOI: 10.1007/s11104-025-08257-x.

APÊNDICES

APÊNDICE A. Médias de produtividade de grãos (kg ha⁻¹) sob inoculação com rizóbio e adubação nitrogenada mineral e relação entre a produtividade com inoculação e produtividade obtida com adubação nitrogenada mineral (RPIN) de 19 genótipos de feijão-comum tipo preto avaliados em sete ambientes.

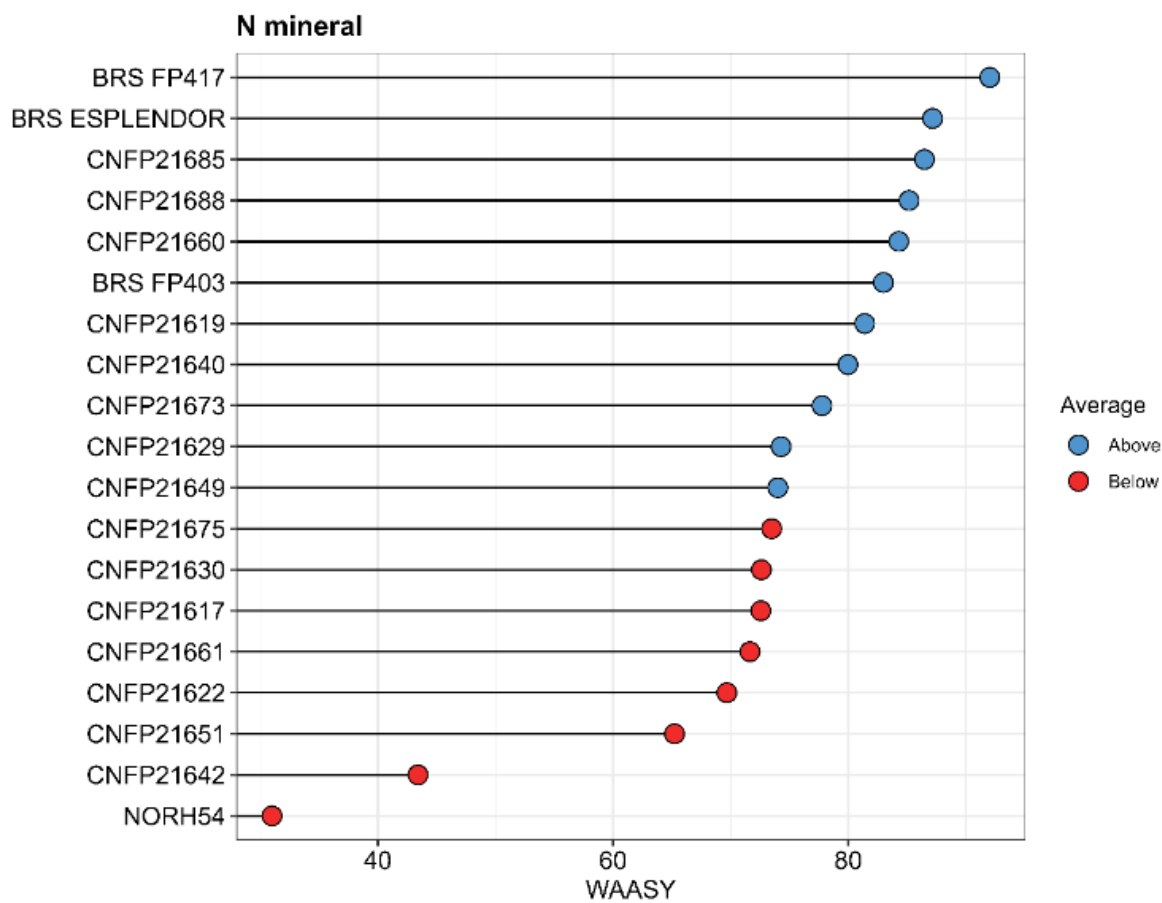
Genótipos	Média	RPIN	STA/GO/Inverno/2023			BSB/DF/Inverno/2023			PG/PR/Águas/2023		
			FBN	N mineral	RPIN	FBN	N mineral	RPIN	FBN	N mineral	RPIN
CNFP 21617	2245 a	76,9	1595 Ba	3366 Aa	47,38	749 Bb	3150 Aa	23,79	2701 Ab	2668 Aa	101,2
CNFP 21619	2063 b	82,1	1912 Aa	2342 Ac	81,63	1084 Ba	2514 Aa	43,12	2176 Ab	2313 Ab	94,1
CNFP 21622	2241 a	102,1	2358 Aa	2522 Ab	93,49	1391 Ba	2346 Ab	59,29	3426 Aa	1868 Bc	183,4
CNFP 21629	2227 a	92,9	2155 Aa	2167 Ac	99,44	1261 Ba	2481 Aa	50,83	2527 Ab	2750 Aa	91,9
CNFP 21630	2173 b	97,9	2002 Aa	1991 Ac	100,55	1263 Ba	2366 Ab	53,38	2660 Ab	2316 Ab	114,9
CNFP 21640	1995 b	90,0	1730 Aa	1752 Ac	98,74	1031 Ba	2268 Ab	45,46	2531 Ab	2310 Ab	109,6
CNFP 21642	2221 a	101,4	1906 Aa	1499 Ac	127,15	1163 Ba	2462 Aa	47,24	2883 Ab	2945 Aa	97,9
CNFP 21649	2245 a	87,3	1404 Bb	2707 Ab	51,86	1180 Ba	2516 Aa	46,90	2736 Ab	2183 Ab	125,3
CNFP 21651	2074 b	85,8	1237 Ab	1642 Ac	75,33	796 Bb	2030 Ab	39,23	3304 Aa	3011 Aa	109,7
CNFP 21660	2339 a	88,9	2288 Ba	3294 Aa	69,45	1693 Ba	2765 Aa	61,23	2464 Ab	2475 Ab	99,6
CNFP 21661	2148 b	94,7	2106 Aa	2096 Ac	100,47	1385 Ba	2307 Ab	60,03	2782 Ab	2150 Bb	129,4
CNFP 21673	2231 a	93,0	1999 Aa	2205 Ac	90,65	1117 Ba	1980 Ab	56,41	2616 Ab	2586 Ab	101,2
CNFP 21675	2330 a	92,2	2061 Ba	3170 Aa	65,01	1746 Aa	2242 Ab	77,88	3097 Aa	2568 Ab	120,6
CNFP 21685	2364 a	87,8	1714 Aa	2235 Ac	76,68	1360 Ba	2156 Ab	63,08	2509 Bb	3175 Aa	79,0
CNFP 21688	2200 a	95,5	2209 Aa	2107 Ac	104,84	1225 Ba	2155 Ab	56,84	3130 Aa	2409 Bb	129,9
BRS FP417	2237 a	85,1	1799 Ba	3099 Aa	58,05	1385 Ba	2762 Aa	50,14	3267 Aa	2822 Aa	115,8
BRS FP403	2325 a	94,2	1556 Aa	2066 Ac	75,31	1492 Ba	2324 Ab	64,20	3138 Aa	2775 Aa	113,1
BRS ESPLENDOR	2439 a	89,0	1661 Ba	2563 Ab	64,8	1209 Ba	2157 Ab	56,05	2468 Ab	2495 Ab	98,9
NORH54	845 c	66,8	474 Ac	580 Ad	81,72	403 Bb	1445 Ab	27,91	817 Ac	1005 Ad	81,3
Media	2154	89,7	1798 B	2284 A	82,24	1206 B	2338 A	51,74	2696 A	2464 B	110,4

Medias seguidas por mesmas letras minúscula na linha e maiúscula na colina (Scott-Knott, $\alpha = 5\%$) não diferem estatisticamente.

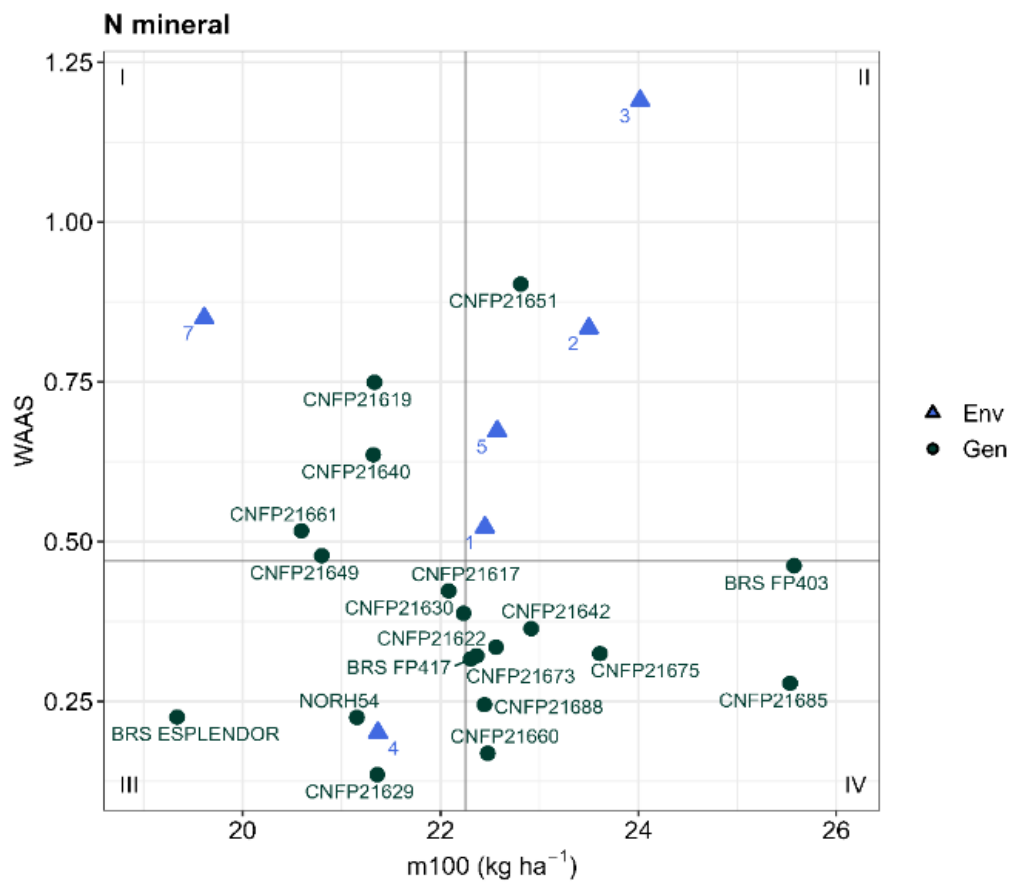
Apêndice A. (Continuação)

Genótipos	SAT/GO/Inverno/2024			SAT/GO/Águas/2024			PG/PR/Seca/2024			PG/PR/Águas/2024		
	FBN	N mineral	RPIN	FBN	N mineral	RPIN	FBN	N mineral	RPIN	FBN	N mineral	RPIN
CNFP 21617	3775 Aa	3570 Aa	105,74	2735 Aa	3092 Aa	88,45	1696 Ac	1830 Ab	92,68	501 Ac	877 Ac	57.13
CNFP 21619	3038 Ba	4228 Aa	71,85	2655 Aa	2504 Ab	106,03	1432 Ad	1325 Ac	108,08	759 Bc	1402 Ab	54.14
CNFP 21622	3392 Aa	3708 Aa	91,47	2738 Aa	2380 Ab	115,04	1807 Ac	1779 Ab	101,57	738 Ac	919 Ac	80.32
CNFP 21629	3345 Aa	3382 Aa	98,90	3102 Aa	2796 Aa	110,94	2066 Ab	1946 Aa	106,17	559 Ac	640 Ac	87.33
CNFP 21630	3579 Aa	3273 Aa	109,34	2858 Aa	2905 Aa	98,38	2076 Ab	1751 Ab	118,56	611 Ac	770 Ac	79.39
CNFP 21640	2941 Aa	3662 Aa	80,31	2418 Aa	2429 Ab	99,55	1515 Ad	1589 Ab	95,34	1080 Ac	1309 Ab	82.51
CNFP 21642	3238 Aa	2005 Ba	161,49	2732 Aa	2227 Ab	122,68	1779 Ac	1835 Ab	96,95	1957 Aa	2305 Aa	84.90
CNFP 21649	3998 Aa	3755 Aa	106,47	2691 Aa	2831 Aa	95,05	1812 Ac	2071 Aa	87,49	829 Ac	718 Ac	115.49
CNFP 21651	2858 Aa	3107 Aa	91,98	2652 Aa	2528 Ab	104,91	1325 Ad	1631 Ab	81,24	1236 Bb	1679 Ab	73.62
CNFP 21660	3366 Aa	3125 Aa	107,71	2552 Aa	2378 Ab	107,32	1696 Ac	1580 Ab	107,34	1347 Ab	1716 Ab	78.50
CNFP 21661	3427 Aa	3232 Aa	106,03	2307 Aa	2809 Aa	82,13	1742 Ac	2099 Aa	82,99	878 Ac	749 Ac	117.19
CNFP 21673	3414 Aa	3367 Aa	101,39	3052 Aa	2929 Aa	104,20	1849 Ac	2201 Aa	84,01	1006 Ac	918 Ac	109.63
CNFP 21675	2821 Aa	3036 Aa	92,91	2328 Aa	2184 Ab	106,59	1785 Ac	1751 Ab	101,94	1813 Aa	2016 Aa	89.93
CNFP 21685	3620 Aa	3579 Aa	101,14	2636 Aa	2540 Ab	103,78	2034 Ab	2224 Aa	91,46	1595 Aa	1716 Ab	92.95
CNFP 21688	3227 Aa	3273 Aa	98,59	2220 Aa	2486 Ab	89,30	1816 Ac	1761 Ab	103,12	1217 Ab	1561 Ab	77.96
BRS FP417	3226 Aa	3231 Aa	99,84	2543 Aa	2322 Ab	109,52	2446 Aa	2289 Aa	106,86	1410 Ab	1542 Ab	91.44
BRS FP403	3482 Aa	3408 Aa	102,17	3028 Aa	2458 Bb	123,19	1534 Bd	2002 Aa	76,62	1554 Aa	1728 Ab	89.93
BRS ESPLENDOR	3014 Ba	3917 Aa	76,94	2720 Aa	2526 Ab	107,68	1724 Ac	1992 Aa	86,55	1602 Aa	1278 Ab	125.35
NORH54	853 Bb	2004 Ab	42,56	580 Ab	817 Ac	70,99	1089 Ad	686 Bd	158,82	522 Ac	555 Ac	94.08
Media	3190 A	3308 A	116,05	2555 A	2481 B	102,41	1748 B	1807 A	99,36	1116 B	1284 A	118,1

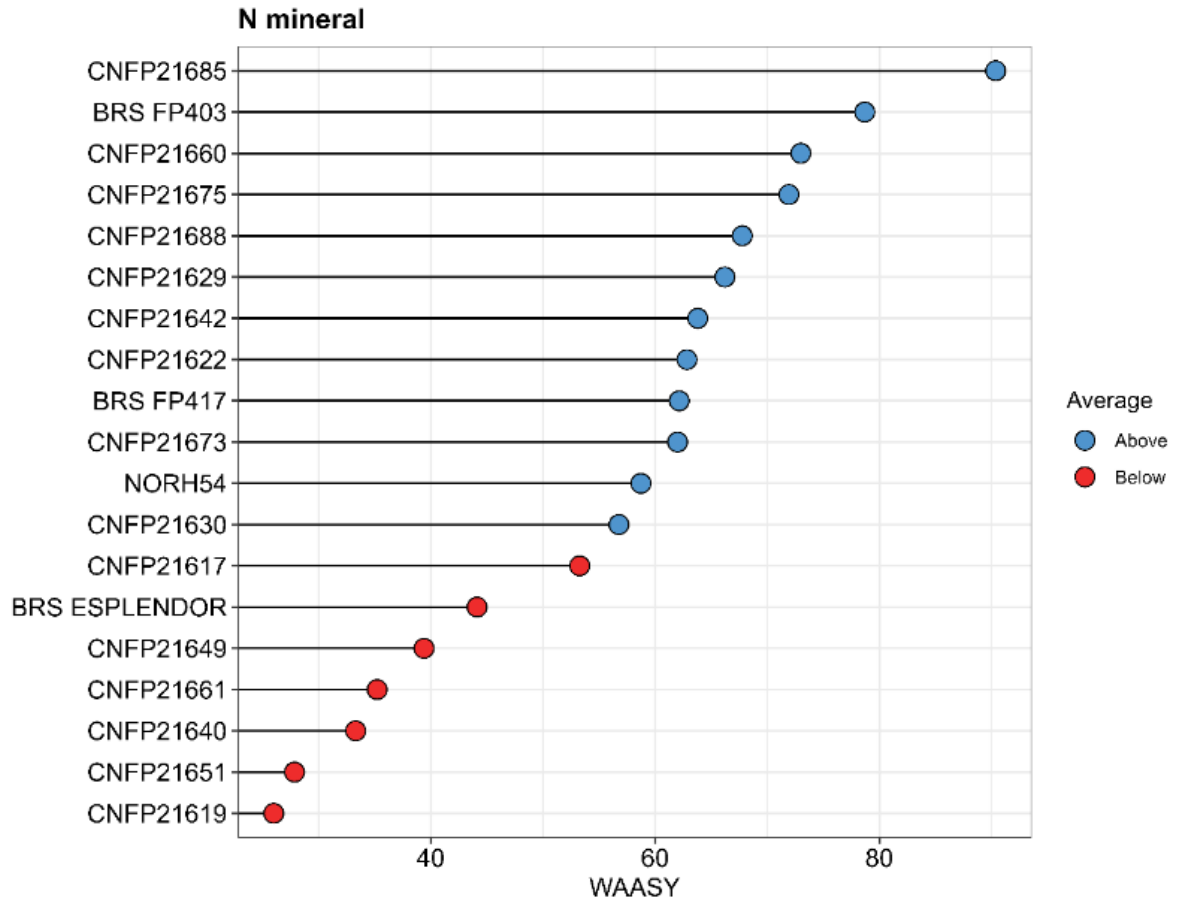
Apêndice B. Ranqueamento de índices de superioridade WAASY para 19 genótipos de feijão-comum tipo preto, considerando ambientes com adubação nitrogenada mineral da variável produtividade.



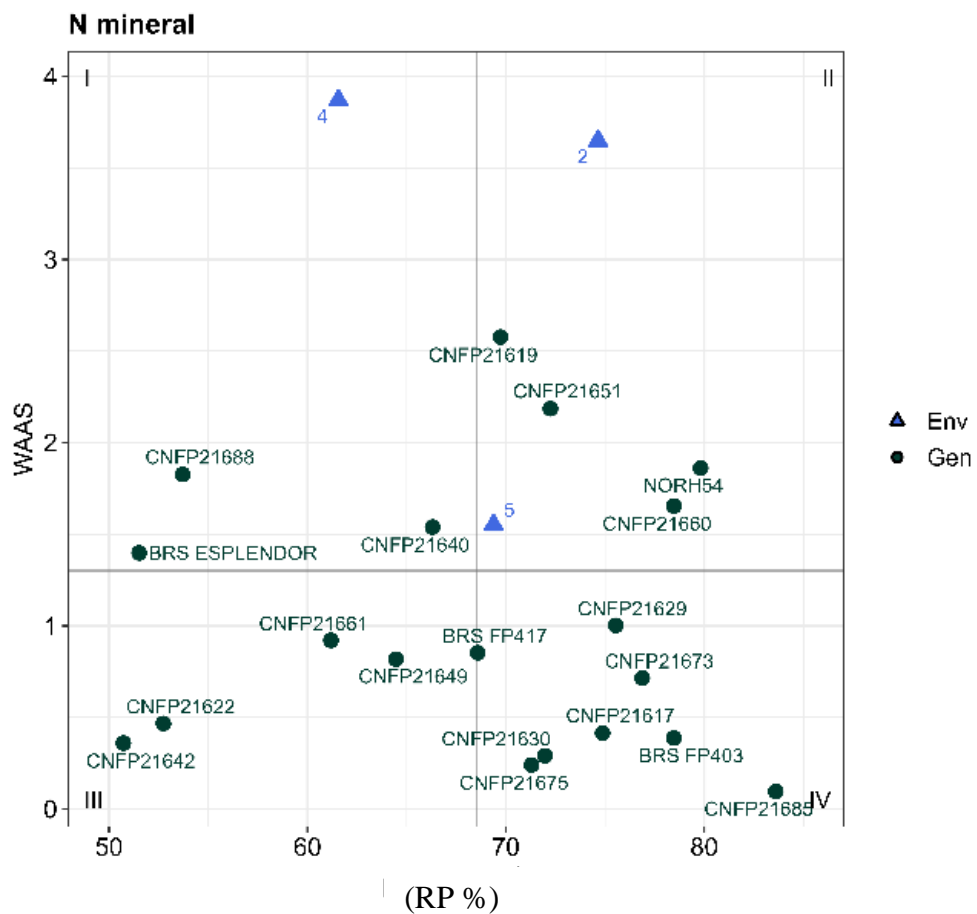
Apêndice C. Biplot dos índices WAAS em função do desempenho de massa de 100 grãos (M100 g) de genótipos de feijão-comum tipo preto, considerando ambientes com adubação nitrogenada mineral.



APENDICE D. Ranqueamento de índices de superioridade WAASY para 19 genótipos de feijão-comum tipo preto, considerando ambientes com adubação nitrogenada mineral, da variável massa de 100 (m100 g).

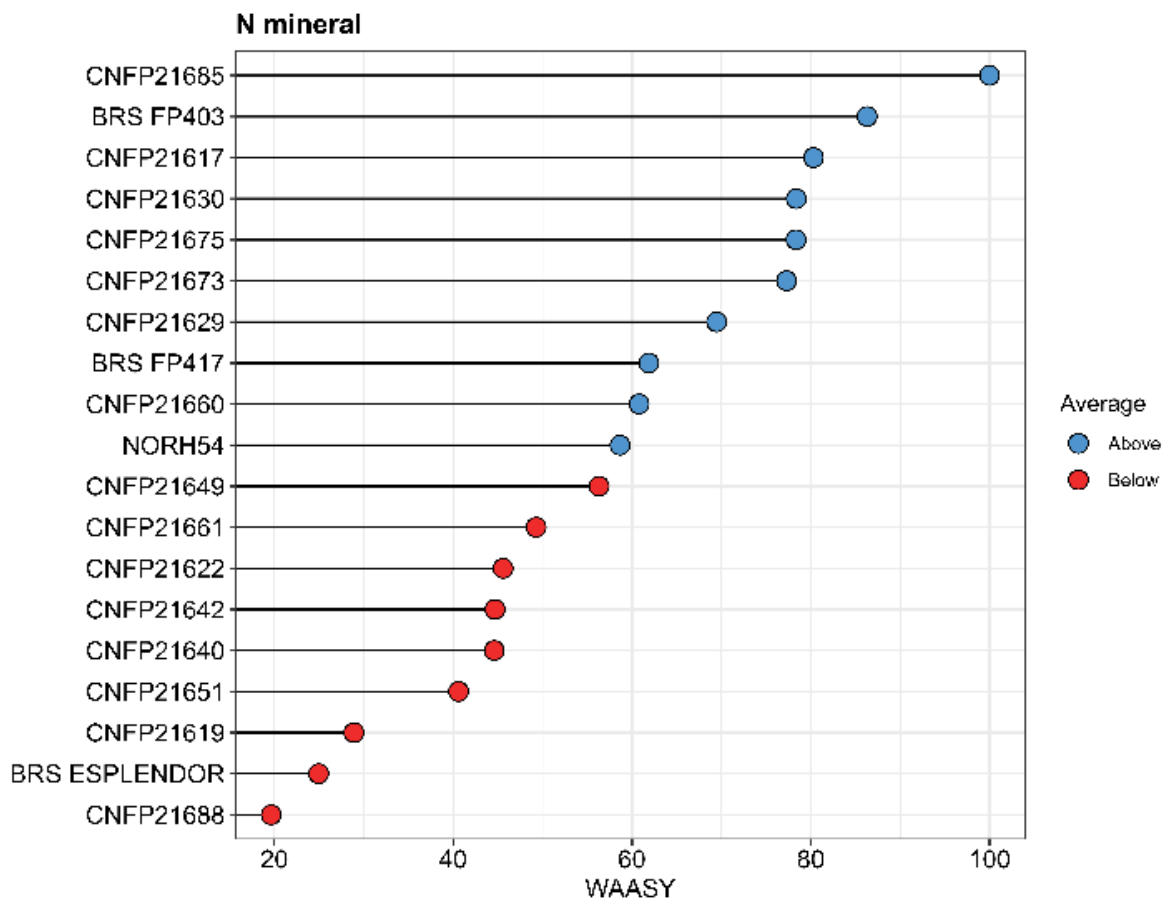


Apêndice E. Biplot dos índices WAAS em função do desempenho de rendimento de peneira.



(RP %) de genótipos de feijão-comum tipo preto, considerando ambientes com adubação nitrogenada mineral.

APENDICE F. Ranqueamento de índices de superioridade WAASY para 19 genótipos de feijão-comum tipo preto, considerando ambientes com adubação nitrogenada mineral, da variável rendimento de peneira (RP %)



Apêndice G. Resumo das análises de variância individuais e conjuntas para cada ambiente passa as variáveis massa de 100 grãos (g), rendimento de peneira (%), avaliação visual de grãos (notas 1-3) e teor de clorofila média (SPAD).

Massa de 100 grãos (M100)												
Ambiente ¹	Fonte de N ²	P-valor						Média		CV ¹¹	AS ¹²	r ¹³
		L ³	T ⁴	L vs T ⁵	L x FN ⁶	T x FN ⁷	L vs T x FN ⁸	L ⁹	T ¹⁰			
SAT/GO/Inverno/2023	FBN	0,000	0,000	0,006				21,99	22,02	3,12	0,96	0,85**
	N mineral	0,000	0,000	0,412	0,630	0,277	0,292	22,50	22,62	4,16	0,93	
BSB/DF/Inverno/2023	FBN	0,000	0,000	0,019				23,52	23,48	2,67	0,98	0,72**
	N mineral	0,000	0,000	0,257	0,174	0,258	0,662	23,57	23,44	3,84	0,94	
PG/PR/Águas/2023	FBN	0,000	0,000	0,000				23,44	23,55	2,62	0,99	0,54*
	N mineral	0,000	0,000	0,692	0,670	0,000	0,014	24,04	24,22	4,10	0,97	
PG/PR/Seca/2024	FBN	0,000	0,000	0,512				21,07	21,22	3,31	0,97	0,84**
	N mineral	0,000	0,000	0,137	0,857	0,408	0,522	21,44	21,33	3,42	0,96	
SAT/GO/Inverno/2024	FBN	0,000	0,000	0,002				22,4	22	3,10	0,97	0,76**
	N mineral	0,000	0,000	0,099	0,637	0,030	0,639	22,71	22	4,38	0,92	
PG/PR/ÁGUAS/2024	FBN	0,000	0,000	0,040				19,42	20,4	3,96	0,97	0,88**
	N mineral	0,000	0,000	0,021	0,033	0,293	0,884	19,51	20,77	3,18	0,98	
Geral		–	–	–	–	–	–	22,14	22	–	–	–

¹SAT: Santo Antônio de Goiás; PG: Ponta Grossa; BSB: Brasília; ²FBN: inoculação com rizóbio, N mineral: adubação mineral nitrogenada; ³P-valor associado à fonte de variação linhagens (L); ⁴P-valor associado à fonte de variação testemunhas (T); ⁵P-valor associado à fonte de variação Linhagens vs Testemunhas; ⁶P-valor associado à fonte de variação interação linhagens por fonte de N; ⁷P-valor associado à fonte de variação interação Testemunhas por fonte de N; ⁸P-valor associado à fonte de variação interação linhagens vs testemunhas por fonte de N; ⁹Média de linhagens; ¹⁰Média de testemunhas (sem NORH54); ¹¹Média geral; ¹²Acurácia seletiva; ¹³Correlação de Spearman: * significativo (p≤ 0,05), **altamente significativo (p≤0,01) pelo teste t de Student.

Teor de clorofila (TC SPAD)												
Ambiente ¹	Fonte de N ²	P-valor						Média		CV ¹¹	AS ¹²	r ¹³
		L ³	T ⁴	L vs T ⁵	L x FN ⁶	T x FN ⁷	L vs T x FN ⁸	L ⁹	T ¹⁰			
SAT/GO/Águas/2024	FBN	0,508	0,556	0,175	0,323	0,757	0,292	41,43	42,6	5,46	-	0,23ns
	N mineral	0,711	0,425	0,950				41,55	42,1	4,29	-	
SAT/GO/Inverno/2024	FBN	0,567	0,496	0,772	0,403	0,820	0,633	42,88	43,5	5,30	-	0,44ns
	N mineral	0,002	0,002	0,659				47,28	47,58	2,76	0,85	
Geral		-	-	-	-	-	-	43,29	43,94	-	-	-

¹SAT: Santo Antônio de Goiás; PG: Ponta Grossa; BSB: Brasília; ²FBN: inoculação com rizóbio, N mineral: adubação mineral nitrogenada; ³P-valor associado à fonte de variação linhagens (L); ⁴P-valor associado à fonte de variação testemunhas (T); ⁵P-valor associado à fonte de variação Linhagens vs Testemunhas; ⁶P-valor associado à fonte de variação interação linhagens por fonte de N; ⁷P-valor associado à fonte de variação interação Testemunhas por fonte de N; ⁸P-valor associado à fonte de variação interação linhagens vs testemunhas por fonte de N; ⁹Média de linhagens; ¹⁰Média de testemunhas (sem NORH54); ¹¹Média geral; ¹²Acurácia seletiva; ¹³Correlação de Spearman: ^{ns}não significativo (p>0,05) pelo teste t de Student.

Avaliação visual de grãos (AVG)

Ambiente ¹	Fonte de N ²	P-valor						Média		CV ¹¹	AS ¹²	r ¹³
		L ³	T ⁴	L vs T ⁵	L x FN ⁶	T x FN ⁷	L vs T x FN ⁸	L ⁹	T ¹⁰			
SAT/GO/Inverno/2023	FBN	0,274	0,000	0,000	0,206	1,000	1,000	1,02	1	11,8	0,99	0,82**
	N mineral	0,274	0,000	0,000				1,02	1	11,8	0,99	
SAT/GO/Inverno/2024	FBN	0,003	0,000	0,083	0,946	0,144	0,676	1,35	1,2	37,7	0,87	0,67**
	N mineral	0,002	0,017	0,209				1,28	1,2	38,1	0,83	
PG/PR/Seca/2024	FBN	0,152	0,062	0,483	0,528	0,460	0,710	2,11	2	28,2	0,63	0,52*
	N mineral	0,243	0,001	0,785				2,28	2,11	21,6	0,74	
Geral		–	–	–	–	–	–	1,31	1,33	–	–	–

¹SAT: Santo Antônio de Goiás; PG: Ponta Grossa; BSB: Brasília; ²FBN: inoculação com rizóbio, N mineral: adubação mineral nitrogenada; ³P-valor associado à fonte de variação linhagens (L); ⁴P-valor associado à fonte de variação testemunhas (T); ⁵P-valor associado à fonte de variação Linhagens vs Testemunhas; ⁶P-valor associado à fonte de variação interação linhagens por fonte de N; ⁷P-valor associado à fonte de variação interação Testemunhas por fonte de N; ⁸P-valor associado à fonte de variação interação linhagens vs testemunhas por fonte de N; ⁹Média de linhagens; ¹⁰Média de testemunhas (sem NORH54); ¹¹Média geral; ¹²Acurácia seletiva; ¹³Correlação de Spearman: * significativo (p ≤ 0,05), **altamente significativo (p ≤ 0,01) pelo teste t de Studen

Rendimento de Peneira (RP %)												
Ambiente ¹	Fonte de N ²	P-valor						Média		CV ¹¹	AS ¹²	r ¹³
		L ³	T ⁴	L vs T ⁵	L x FN ⁶	T x FN ⁷	L vs T x FN ⁸	L ⁹	T ¹⁰			
BSB/DF/Inverno/2023	FBN	0,000	0,002	0,002	0,001	0,000	0,288	75,17	71,45	11,02	0,89	0,48*
	N mineral	0,000	0,000	0,000				75,83	68,58	5,78	0,97	
SAT/GO/Inverno/2024	FBN	0,000	0,000	0,071	0,482	0,016	0,309	65,76	63	8,07	0,97	0,86**
	N mineral	0,000	0,000	0,793				69,51	65	8,55	0,97	
PG/PR/Seca/2024	FBN	0,000	0,000	0,044	0,104	0,225	0,063	63,04	62	11,20	0,96	0,90**
	N mineral	0,000	0,000	0,000				59,42	65	7,74	0,98	
Geral		–	–	–	–	–	–	68,12	63,75	–	–	–

¹SAT: Santo Antônio de Goiás; PG: Ponta Grossa; BSB: Brasília; ²FBN: inoculação com rizóbio, N mineral: adubação mineral nitrogenada; ³P-valor associado à fonte de variação linhagens (L); ⁴P-valor associado à fonte de variação testemunhas (T); ⁵P-valor associado à fonte de variação Linhagens vs Testemunhas; ⁶P-valor associado à fonte de variação interação linhagens por fonte de N; ⁷P-valor associado à fonte de variação interação Testemunhas por fonte de N; ⁸P-valor associado à fonte de variação interação linhagens vs testemunhas por fonte de N; ⁹Média de linhagens; ¹⁰Média de testemunhas (sem NORH54); ¹¹Média geral; ¹²Acurácia seletiva; ¹³Correlação de Spearman: * significativo ($p \leq 0,05$), **altamente significativa ($p \leq 0,01$) pelo teste t de student.