



**TAINÉ TEOTÔNIO TEIXEIRA DA ROCHA**

**POTENCIAL SINÉRGICO DE CULTIVARES DE FEJJOEIRO-COMUM E  
BACTÉRIAS FIXADORAS DE NITROGÊNIO**

**LAVRAS - MINAS GERAIS  
2024**

**TAINÉ TEOTÔNIO TEIXEIRA DA ROCHA**

**POTENCIAL SINÉRGICO DE CULTIVARES DE FEIJOEIRO-COMUM E  
BACTÉRIAS FIXADORAS DE NITROGÊNIO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Adriano Teodoro Bruzi  
Orientador

Profa. Dra. Christiane Augusta Diniz Melo  
Coorientadora

Profa. Dra. Fátima Maria de Souza Moreira  
Coorientadora

**LAVRAS - MINAS GERAIS  
2024**

## FICHA CATALOGRÁFICA

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

Rocha, Taine Teotônio Teixeira da.

Potencial sinérgico de cultivares de feijoeiro-comum e  
bactérias fixadoras de nitrogênio / Taine Teotônio Teixeira da  
Rocha. - 2024.

93 p. : il.

Orientador(a): Adriano Teodoro Bruzi.

Coorientador(a): Christiane Augusta Diniz Melo, Fátima Maria  
de Souza Moreira.

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

Bibliografia.

1. Rizóbios. 2. Sensoriamento remoto. 3. *Phaseolus vulgaris* L.  
Bruzi, Adriano Teodoro. II. Melo, Christiane Augusta Diniz. III.  
Moreira, Fátima Maria de Souza. IV. Título.

**TAINÉ TEOTÔNIO TEIXEIRA DA ROCHA**

**POTENCIAL SINÉRGICO DE CULTIVARES DE FEIJOEIRO-COMUM E  
BACTÉRIAS FIXADORAS DE NOTROGÊNIO**

**SINERGIC POTENTIAL OF COMMON BEAN CULTIVARS AND NITROGEN  
FIXATION BACTERIAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 16/02/2024

Dr. Adriano Teodoro Bruzi – UFLA  
Dr. Silvino Guimarães Moreira - UFLA  
Dra. Janine Magalhães Guedes - EPAMIG

Prof. Dr. Adriano Teodoro Bruzi  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2024**

*À minha mãe, Maria Margarida, por todo o cuidado e confiança, a causa primordial das minhas realizações.*  
*À minha irmã Taise, por ser a minha maior motivação diante dos desafios.*  
*E sobretudo, a Deus.*  
*Dedico.*

## **AGRADECIMENTOS**

*A Deus, pela dádiva do ontem, do hoje e do amanhã que nascerá.*

*A Universidade Federal de Lavras pela infraestrutura, recursos, oportunidades acadêmicas e ensino de excelência proporcionadas durante o desenvolvimento desta pesquisa.*

*O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.*

*O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG)*

*A minha família pelo constante apoio, compreensão e encorajamento ao longo deste desafiador percurso.*

*Ao meu orientador Adriano Teodoro Bruzi pela orientação e amizade, insights valiosos e paciência ao longo deste estudo.*

*As minhas coorientadoras Christiane Melo e Fátima Moreira pela, sugestão, construção e elaboração de ideias fundamentais para a pesquisa.*

*Aos amigos e colegas “Pesquisa Soja” pelo suporte, pelos ensinamentos, aprendizados e sorrisos.*

*Aos meus amigos Julia Passos, Paulo Fróis, Carlos Henrique, Mateus Piza, Maria Angélica Maçola, Maria Fernanda Soares e Adelmo Miranda, pela nobreza de cada instante compartilhado.*

**Muito Obrigada!**

*“Enquanto eu tiver perguntas e não houver resposta continuarei a escrever.”*  
*(Clarice Lispector)*

## RESUMO

O nitrogênio é o nutriente mais demandado pelo feijoeiro-comum, assim como por outras leguminosas. Muito embora este apresente a capacidade de associar-se simbioticamente com bactérias diazotróficas, essa capacidade muitas vezes é subestimada, em função da grande variabilidade na eficiência da fixação biológica de nitrogênio (FBN). A avaliação quantitativa, precisa e não destrutiva de variáveis que correlacionam com o rendimento torna-se uma prioridade para otimizar a produtividade das culturas. O diagnóstico remoto surge como uma alternativa promissora. Neste âmbito, os índices de vegetação são comumente aplicados, devido à sua capacidade de estimar características biofísicas e conseqüentemente, o potencial produtivo. Ante o exposto, objetivou-se avaliar a capacidade combinatória de cultivares de feijoeiro-comum para a FBN tal como o desenvolvimento vegetativo e a correlação dos índices de vegetação com características biofísicas em cultivares de feijoeiro-comum, inoculadas com diferentes estirpes de *Rhizobium*. Foram conduzidos três experimentos, um em casa de vegetação da Universidade Federal de Lavras (UFLA) e outros dois à campo, nos municípios de Lavras e Carrancas, MG. Os tratamentos foram atribuídos no delineamento em blocos casualizados completos (DBCC), em esquema fatorial, com quatro repetições. Em casa de vegetação, 15 cultivares de feijoeiro-comum e três estirpes de *Rhizobium* foram avaliadas quanto à capacidade geral e específica de combinação. No florescimento pleno foi avaliado o índice SPAD, massa da matéria seca da parte aérea e radicular, relação de nódulos viáveis, matéria seca de nódulos e N total nas folhas. Foram selecionadas sete cultivares de feijoeiro-comum e uma estirpe, quanto à capacidade geral de combinação para os experimentos de campo. As avaliações ocorreram aos 25, 35, 50, e 65 dias após a semeadura (DAS) para os caracteres altura, largura e índice SPAD. No florescimento pleno, avaliou-se o teor de nitrogênio, matéria seca de nódulos, matéria fresca e seca da parte aérea e raiz. Por ocasião da colheita, foi obtido o número de vagens, peso de cem grãos e a produtividade de grãos. Em Lavras, aos 50 DAS, as avaliações incluíram também imagens aéreas, obtidas com um drone Phantom 4 Pro Advanced com sensor RGB. A partir das imagens digitais, foram estimados os índices de vegetação GLI, MPRI e VARI, e a cobertura do dossel com a contagem de pixels. Os resultados obtidos permitem inferir que: a análise dialélica entre as cultivares e estirpes de *Rhizobium* revela predominância dos efeitos aditivos nas características relacionadas à FBN; existe variabilidade entre os genótipos de feijoeiro-comum, indicando potencial ganho genético na seleção para aumentar a capacidade de FBN; a inoculação com *Rhizobium* promove incrementos na produtividade de forma equivalente à adubação mineral; a estirpe UFLA 02-100 tem potencial para uso como inoculante na cultura do feijoeiro-comum; os índices GLI, MPRI e VARI não apresentam correlação significativa com o teor de nitrogênio em plantas de feijoeiro; a estimativa da cobertura do dossel de plantas de feijoeiro-comum obtida pela contagem de pixels é eficiente, e apresenta correlação significativa com a produtividade de grãos, evidenciando ser uma opção factível na avaliação do vigor vegetativo desta cultura.

Palavras-chave: Rizóbios. Melhoramento de plantas. Produtividade de grãos. Índice de vegetação. Análise de imagem. *Phaseolus vulgaris*.

## ABSTRACT

Nitrogen is the most demanded nutrient by common bean plants, as well as by other legumes. Although it has the ability to symbiotically associate with diazotrophic bacteria, this capability is often underestimated due to the significant variability in biological nitrogen fixation (BNF) efficiency. Achieving a quantitative, precise, and non-destructive evaluation of variables correlated with yield is imperative for optimizing crop productivity. Remote sensing emerges as a promising alternative for such evaluations, with vegetation indices commonly applied due to their ability to estimate biophysical traits and yield potential. The objective of this study was to evaluate the combining ability of common bean cultivars for BNF, vegetative development, and the correlation of vegetative indices with biophysical characteristics in cultivars inoculated with different strains of *Rhizobium*. Three experiments were conducted – one in the greenhouse of the Federal University of Lavras (UFLA) and two in the field in the municipalities of Lavras and Carrancas, MG. In the greenhouse, 15 common bean cultivars and three *Rhizobium* strains were evaluated for general and specific combining ability. At full flowering, assessments included the SPAD index, aboveground and root dry matter, viable nodule ratio, nodule dry matter, and total N in leaves. Based on general combining ability, seven common bean cultivars and one strain were selected for field testing. In the field, evaluations were conducted at various stages, including height, width, and SPAD index at 25, 35, 50, and 65 days after sowing (DAS). At full flowering, nitrogen content, nodule dry matter, fresh and dry matter of aboveground and root were measured. Harvest parameters included the number of pods, weight of one hundred grains, and grain yield. In Lavras, at 50 DAS aerial images obtained with a Phantom 4 Pro Advanced drone with an RGB sensor were also included. From the digital images, vegetation indices such as GLI, MPRI, and VARI, and canopy coverage with pixel counting were calculated. Diallel analysis between cultivars and *Rhizobium* strains revealed a predominance of additive effects in traits related to BNF. Variability among common bean genotypes indicates potential genetic gain in selection for an increase in BNF capacity. *Rhizobium* inoculation was found to promote yield increments similar to mineral fertilization, with strain UFLA 02-100 showing potential for use as an inoculant in the common bean crop. While GLI, MPRI, and VARI indices did not exhibit a significant correlation with nitrogen content in common bean plants, estimating canopy coverage using pixel counting proved to be efficient and showed a significant correlation with grain yield. This indicates it as a feasible option for assessing the vegetative vigor of this crop.

Keywords: Rhizobia. Plant breeding. Grain yield. Vegetation index. Image analysis. *Phaseolus vulgaris*.

## **Impactos sociais, tecnológicos, econômicos e culturais**

O feijoeiro-comum destaca-se pela sua significativa importância socioeconômica-ambiental. Constitui uma das principais fontes de proteína vegetal de baixo custo, sendo considerado um dos pilares para a sustentabilidade e segurança alimentar. O Brasil é um dos principais produtores desse grão, embora a sua produtividade média seja pouco expressiva. Nesse contexto, fatores bióticos e abióticos estão associados ao baixo rendimento de grãos. Entre os fatores abióticos, destaca-se a escassez de insumos agrícolas, como fertilizantes nitrogenados. O nitrogênio é o nutriente mais demandado pela cultura do feijão, podendo ser fornecido, principalmente, pela adubação mineral ou pela fixação biológica de nitrogênio (FBN). A adubação mineral aumenta os custos de produção devido ao alto valor desse insumo e às emissões de gases de efeito estufa, associadas à dinâmica de perdas de nitrogênio no sistema de produção. Por outro lado, a FBN oferece uma alternativa de baixo custo e ambientalmente sustentável. Em relação à simbiose com bactérias fixadoras de nitrogênio, há uma ampla variabilidade entre genótipos de feijoeiro-comum e estirpes de rizóbios em termos de resposta e eficiência de fixação. Com o intuito de incrementar ferramentas que subsidiam o acompanhamento e avaliação da cultura à campo, o monitoramento remoto é uma alternativa promissora. Nesse contexto, os índices de vegetação são frequentemente utilizados devido à sua capacidade de estimar características biofísicas e, conseqüentemente, o potencial produtivo. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar a capacidade combinatória de cultivares de feijoeiro-comum para a FBN, bem como o desenvolvimento vegetativo e a correlação dos índices de vegetação com características biofísicas em cultivares de feijoeiro-comum inoculadas com diferentes estirpes de *Rhizobium*. Os resultados evidenciaram o predomínio de efeitos aditivos nas características relacionadas à FBN, o que pode direcionar estratégias em programas de melhoramento genético do feijoeiro-comum visando aumentar a eficiência da FBN. Ademais, o estudo revelou a eficácia da inoculação com rizóbios na produtividade de grãos em cultivares de feijoeiro-comum, obtendo-se respostas equivalentes à adubação mineral. Demonstra-se também o potencial de uma estirpe de rizóbio como inoculante, ampliando assim a disponibilidade de inoculantes para o feijoeiro-comum. Os índices de vegetação revelaram-se precisos na estimativa de características biofísicas na cultura do feijoeiro, otimizando a avaliação dessas características. A exploração da FBN e dos índices de vegetação na cultura do feijoeiro-comum, visando aumentar a produtividade e a sustentabilidade do sistema é irrefutavelmente efetiva. Vale ressaltar que a produção brasileira de feijão-comum é majoritariamente proveniente da agricultura familiar, destacando-se o respaldo dos resultados deste estudo para a produção desse grão, considerando o baixo custo econômico e ambiental promovido pela FBN. Os impactos deste trabalho estão alinhados com a Agenda 2030, particularmente no que diz respeito à fome zero, agricultura sustentável, consumo e produção responsáveis, e ação contra a mudança climática global.

## **Social, technological, economic and cultural impacts**

The common bean stands out for its significant socio-economic and environmental importance. It constitutes one of the main sources of low-cost plant protein, being considered a cornerstone of sustainability and food security. Brazil stands out as one of the leading producers of this grain; however, considering the potential of our cultivars, the average Brazilian productivity of common beans is relatively low. In this scenario, both biotic and abiotic factors are related to the low grain yield. Among the abiotic factors, the low supply of agricultural inputs, such as nitrogenous fertilizers, can be elucidated. Nitrogen is the most demanded nutrient by the common bean crop, and it can be provided mainly through mineral fertilization or biological nitrogen fixation (BNF). Mineral fertilization is linked to increased production costs due to the high value of this input, as well as to greenhouse gas emissions, due to the dynamics of nitrogen losses in the production system. Conversely, nitrogen derived from biological fixation represents a low-cost and environmentally sustainable pathway. Regarding the symbiosis with nitrogen-fixing bacteria, we know of the wide variability among common bean genotypes and rhizobial strains regarding the response and efficiency of fixation. With the aim of achieving high yields coupled with more sustainable production, remote sensing of crops emerges as a promising alternative. In this context, vegetation indices are commonly applied due to their ability to estimate biophysical characteristics and, consequently, the productive potential. Thus, the objective of this study was to evaluate the combining ability of common bean cultivars for BNF, as well as vegetative development and the correlation of vegetation indices with biophysical characteristics in common bean cultivars inoculated with different *Rhizobium* strains. The results highlighted the predominance of additive effects on characteristics related to biological nitrogen fixation. This knowledge allows for the foundation and direction of strategies in common bean breeding programs aimed at increasing BNF efficiency, presenting great potential for improvement in this trait. The study also revealed the effectiveness of inoculation with rhizobia on grain yield in common bean cultivars, achieving responses equivalent to mineral fertilization. Furthermore, we demonstrated the potential of a rhizobial strain for use as an inoculant for the crop, enabling the expansion of the inoculant production chain for common beans. Vegetation indices proved to be accurate in estimating biophysical characteristics in common bean cultivation, allowing for optimization in their assessment. The exploration of BNF and vegetation indices in common bean cultivation, aiming at productivity and system sustainability, is undeniably efficient. It is noteworthy that Brazilian common bean production is mainly derived from family farming, highlighting the support of our results on grain production, considering the low economic and environmental cost promoted by BNF. In pursuit of the fulfillment of the 2030 Agenda, the impacts of this work are associated with zero hunger and sustainable agriculture, responsible consumption and production, and action against global climate change.

## SUMÁRIO

	<b>PRIMEIRA PARTE</b> .....	<b>11</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>11</b>
2.1	Feijoeiro-comum ( <i>Phaseolus vulgaris</i> L.).....	11
2.2	Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) .....	13
2.3	Melhoramento genético do feijoeiro-comum .....	15
2.4	Controle genético da FBN .....	17
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>20</b>
	<b>SEGUNDA PARTE – ARTIGOS*</b> .....	<b>27</b>
	<b>ARTIGO 1: CAPACIDADE COMBINATÓRIA DE CULTIVARES DE FEIJÃO PARA A FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO</b> .....	<b>28</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>30</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>31</b>
2.1	Localização e implantação dos experimentos .....	31
2.2	Cultivares de feijoeiro-comum e estirpes de <i>Rhizobium</i> avaliadas .....	32
2.3	Quantificação do número de células viáveis de rizóbios no solo.....	33
2.4	Experimento em casa de vegetação .....	36
2.5	Experimento a campo .....	39
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>41</b>
3.1	Experimento em casa de Vegetação .....	41
3.1.1	Capacidade combinatória para FBN em feijoeiro-comum.....	47
3.2	Experimento a campo .....	53
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>59</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>60</b>
	<b>APÊNDICE A</b> .....	<b>69</b>
	<b>ARTIGO 2: DISSECANDO O DESENVOLVIMENTO VEGETATIVO EM FEJJOEIRO: ANÁLISE DE IMAGENS NA CONTEXTUALIZAÇÃO DA FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO.</b> .....	<b>70</b>
	<b>RESUMO</b> .....	<b>70</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>72</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>73</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>77</b>
3.1	Desenvolvimento vegetativo de cultivares de feijão com <i>Rhizobium</i> .....	77
3.2	Estimativa da produção de feijoeiro-comum por meio de índices de vegetação ...	82
	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>85</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>86</b>

## **PRIMEIRA PARTE**

## 1 INTRODUÇÃO

O feijoeiro-comum é uma espécie com alta demanda nutricional, constituindo-se o nitrogênio (N) o nutriente mais extraído. A exportação média de N corresponde a 36,5 kg por tonelada de grão produzida (MORTINHO *et al.*, 2022; SORATTO *et al.*, 2013). As doses de nitrogênio requeridas variam entre 40 a 100 kg ha<sup>-1</sup>, observando-se ganhos com doses superiores a 120 kg ha<sup>-1</sup> em diferentes genótipos (SORATTO *et al.*, 2017). Ademais, há um grande número de cultivares, evidenciando a variabilidade de genótipos com diferentes eficiências e respostas aos nutrientes (LEAL *et al.*, 2019). No entanto, geralmente os solos tropicais são deficientes em N, principalmente pelo baixo aporte de matéria orgânica, carecendo-se de alternativas para o seu fornecimento.

A fixação biológica de N (FBN), revela-se como uma alternativa para o fornecimento de N (SHIBATA *et al.*, 2017). Todavia, a substituição total ou parcial do N-mineral pela inoculação com *Rhizobium* na cultura não é um consenso, em função das variações dos resultados, sobretudo relacionados com a ampla variabilidade dos genótipos e estirpes quanto a resposta para FBN.

Um número expressivo de características intrínsecas à planta relaciona-se diretamente ao potencial da FBN, incluindo a nodulação, fotossíntese, acúmulo de biomassa e partição de fotoassimilados para os nódulos, sendo essa, uma característica quantitativa, influenciada pelo ambiente, que afeta significativamente a sua expressão (KAMFWA; CICHY e KELLY, 2015). Assim, seria oportuno obter informações acerca destes caracteres, visando nortear estratégias nos programas de melhoramento do feijoeiro-comum para a FBN. Na cultura da soja, estimativas acerca desta temática foram obtidos por Carvalho *et al.* (2022), no qual os autores concluíram que existem efeitos aditivos e não aditivos nas características relacionadas a simbiose. No feijoeiro-comum, não foram encontrados relatos na literatura a este respeito.

Ademais, a atual agricultura tem como foco o uso de tecnologias que visam aumentar a disponibilidade de N e a produtividade de grãos de forma mais sustentável, assim como aplicação de ferramentas diretas e indiretas que auxiliem no manejo das culturas. Neste âmbito, a biomassa acima do solo é um caráter importante para a formulação de medidas de manejo, como fertilização e irrigação (ARAUS; CAIRNS, 2014). O monitoramento rápido e não destrutivo das informações sobre o crescimento do feijoeiro-comum é de suma importância também para o manejo preciso e a estimativa de rendimento durante o seu crescimento (BARBOZA *et al.*, 2023). Contudo, em muitas culturas agrícolas, a quantificação da biomassa

segue o protocolo de amostragem direta e destrutiva, requerendo áreas amostrais representativas, além de ser dispendioso e apresentar menor acurácia, devido a subjetividade.

Com o intuito de otimizar a obtenção de informações acerca do desenvolvendo das culturas, os índices de vegetação (IV) têm sido amplamente utilizados devido à sua capacidade de prever e avaliar características da cobertura vegetal, como a estimativa de área foliar, produção de biomassa e produtividade. A biomassa é uma característica inerente ao processo de crescimento e desenvolvimento das culturas, que se correlaciona diretamente com os IV (BARBOZA *et al.*, 2023). Em muitas culturas, a aplicação dessa ferramenta apresenta-se como uma alternativa assertiva, descrita pela acurácia e precisão dos modelos (BAYARAA *et al.*, 2022; CARNEIRO *et al.*, 2022; VENÂNCIO *et al.*, 2020). Entretanto, são poucos os estudos que utilizaram índices de vegetação para estimar a biomassa do feijoeiro.

Logo, para identificar e selecionar genótipos de feijoeiro superiores para a fixação biológica de N (FBN), tal como ampliar o destaque da análise remota na cultura, objetivou-se avaliar a capacidade combinatória de cultivares de feijoeiro-comum para a FBN, tal como o desenvolvimento vegetativo e a correlação dos índices de vegetação com características biofísicas em cultivares de feijoeiro-comum, inoculadas com diferentes estirpes de *Rhizobium*.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.)

O Brasil constitui-se em um dos maiores produtores de feijão, com dados da safra 2022/23 de 3 milhões de toneladas (CONAB, 2023). No país, o seu cultivo ocorre ao longo de todo o ano, a depender da região, com a semeadura em três safras estacionais, “safra das águas ou de verão”, de agosto a novembro e colheita de novembro a fevereiro, “safra da seca ou safrinha”, de dezembro a março e colheita de março a junho e a “safra de outono/inverno ou irrigado”, com plantio de abril a julho e colheita de julho a outubro (WANDER, 2007). O cultivo ocorre com variados níveis de tecnificação, abrangendo todos os biomas do país (SNAK; SALINAS, 2020), sob diferentes sistemas de produção, como monocultura ou consórcio (FARIA *et al.*, 2013), caracterizando-se como uma cultura dinâmica e com ampla adaptação edafoclimática.

O feijoeiro é uma planta herbácea, com genótipos de hábito crescimento determinado com plantas eretas (Tipo I), ou indeterminado com plantas semieretas (II), prostrado (III) e trepador (IV) (SILVA; BRUZI; RAMALHO, 2002). As cultivares de feijão são classificadas quanto ao ciclo em tardio ou precoce, variando de 60 a 100 dias. Em relação aos seus grãos

existe uma grande diversidade quanto a coloração, forma e tamanho, abrangendo os grupos Carioca, Preto, Vermelho, Mulatinho, Branco, entre outros. O carioca é o mais semeado no país, representando 63% da produção brasileira, seguido do feijão Caupi (19%) e feijão preto (18%) (DEPEC, 2017). O seu ciclo é dividido em dez estádios fenológicos, compreendendo os estágios vegetativos e reprodutivos. A fase vegetativa (V) é constituída dos estádios V0 (Germinação), V1 (Emergência), V2 (Desenvolvimento das folhas primárias), V3 (Desenvolvimento da primeira folha trifoliolada), e V4 (Desenvolvimento de três folhas trifolioladas), e a reprodutiva (R) dos estádios R5 (Pré-floração), R6 (Pleno florescimento), R7 (Formação das vagens), R8 (Enchimento das vagens) e R9 (Maturação) (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

O feijoeiro-comum é uma planta de alta demanda nutricional na qual a absorção de nutrientes acompanha a curva de crescimento da planta, isto é, os estádios de maior exigência equivalem a fase que antecede o maior crescimento da cultura. Esse perfil de exigências concentra-se em função do pequeno e pouco profundo sistema radicular e do ciclo curto, fazendo-se fundamental que o nutriente esteja à disposição da planta em tempo e local adequados (ROSOLEM; MARUBAYASHI, 1994). Os estádios V4, R5, R6 e R7, correspondem ao rápido e máximo acúmulo de nutrientes (OLIVEIRA *et al.*, 2018). Todavia, a disponibilidade de nutrientes e água deve ocorrer durante todo o seu ciclo, sendo estes, fatores decisivos na produtividade da lavoura.

O feijoeiro-comum é uma planta de metabolismo C3, sendo exigido ao longo de todo o ciclo uma lâmina de água de no mínimo 300 mm, com absorções diárias entre 3 a 4 mm (BACK, 2001). Quando submetido a deficiência hídrica nos primeiros 20 dias, pode-se verificar uma redução de 16 a 42% na produção de grãos quando comparado com a produtividade de uma planta em condições de campo de 0,01 MPa (VIEIRA; JUNIOR; BORÉM, 2006).

Em relação as condições de temperatura, este é um fator limitante para o seu cultivo, já que se mostra sensível a temperaturas extremas, sendo a média ótima entre 18 e 24 °C, a temperatura ideal de 21 °C (VIEIRA; JUNIOR e BORÉM, 2006) e a temperatura base de 10 °C (PORTES, 1996). Entre as cultivares de feijoeiro, há uma variação de graus dias acumulados (GD) para que ocorra o desenvolvimento acerca da sua fenologia. Para as cultivares Pérola e BRS Requite foram constatadas GD acumulados variando de 950 a 1200 e 800 a 900, respectivamente, para atingir o estágio R8 (SILVA *et al.*, 2020).

O conhecimento e combinação adequada dos componentes bióticos e abióticos nos ecossistemas é fundamental para a obtenção de altos índices produtivos e melhor aproveitamento da cultura (HUNGRIA; VARGAS, 2000), o que inclui também a FBN.

## 2.2 Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN)

A FBN é um processo bioquímico de conversão do nitrogênio ( $N_2$ ) atmosférico à amônia ( $NH_3$ ) por bactéria simbióticas, associativas e de vida livre (DIXON e KAHN, 2004), considerado o segundo processo mais importante da biosfera (MENDES *et al.*, 2010). A conversão e fixação de N por bactérias simbióticas em plantas leguminosas ocorre por meio de uma série de reações de oxirredução e inicia-se por meio de sinalizações e respostas moleculares, específicas entre a bactéria fixadora e o hospedeiro. As reações são catalisadas por um complexo nitrogenase de dois componentes, a ferro-proteína (Fe-proteína) e molibdênio-ferro-proteína (MoFe-proteína) (YAN *et al.*, 2010) com o gasto de 16 mols de Adenosina Trifosfato (ATP) (CARVALHO; FERREIRA e HEMERLY, 2011). A simbiose não é obrigatória, todavia, é uma resposta predisposta às condições de deficiência de N, formando estruturas especializadas nas raízes, denominadas nódulos (TAIZ *et al.*, 2017).

Para suprir as demandas de energia no processo e a sobrevivência do bacterioide, devem ser altas as taxas de respiração. Por outro lado, a nitrogenase é irreversivelmente inativada pelo oxigênio; para tanto, ocorre o controle do fluxo de  $O_2$  a partir de uma barreira de difusão no córtex dos nódulos (MATTHAY *et al.*, 2019) e a disponibilidade de  $O_2$  é feita de forma contínua e suficiente para manter a respiração e a energia do processo, em níveis não deletérios à nitrogenase.

O transporte de  $O_2$  nos nódulos é feita pela leghemoglobina, uma proteína nodulina de alta afinidade com essa molécula, com aproximadamente  $K_m \approx 0,01 \mu M$  ( $K_m$  é uma medida da afinidade da enzima pelo substrato, quanto menor o  $K_m$  maior a afinidade) (DELNERI, 2001), responsável pela coloração interna avermelhada dos nódulos, e um indicativo da atividade do nódulo (HUNGRIA *et al.*, 2006; SINCLAIR; VADEZ, 2012). Além do consumo de ATP, os nódulos precisam assimilar carbono como fonte de energia ao bacterioide, para a produção de esqueletos de carbono à assimilação do  $NH_4$  produzido, para o crescimento e para biossíntese de amido (SCHURBERT, 2002), compensado pelo aumento da taxa fotossintética, que pode aumentar em até 28%, resultante da simbiose (KASCHUK *et al.*, 2009).

A  $NH_3$  produzida nos nódulos é reduzida a amônio ( $NH_4^+$ ) ao entrar em contato com o substrato aquoso do citoplasma dos bacterioides e liberada por difusão para o citosol da célula

infectada. O acúmulo de  $\text{NH}_4^+$  é tóxico, logo este é incorporado no metabolismo vegetal em formas orgânicas, como ureídeos (leguminosas tropicais), amidas (leguminosas de clima temperado) e aminoácidos (TAIZ *et al.*, 2017); esses são translocados dos nódulos para a parte aérea via xilema, onde efetuarão as rotas de assimilação do N, sendo as enzimas glutamato sintetase (GOGAT) e glutamina sintase (GS) as principais percussoras dessas reações e um indicativo da eficiência da FBN (CHRISTOPHE *et al.*, 2011).

A eficiência da FBN em leguminosas é influenciada por diversos fatores biológicos, químicos e físicos, que podem atuar sobre a bactéria e, ou sobre o hospedeiro, limitando o estabelecimento, desenvolvimento e funcionamento da simbiose mutualística, variando conforme a espécie simbiote (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Nesta condição, as interferências ocorrem a partir do pH do solo, toxidez por alumínio, salinidade e baixa fertilidade do solo, disponibilidade de N mineral, fósforo e micronutrientes, altas temperaturas do solo, luminosidade, estresse hídrico, tipo de solo, textura e composição (BENIZRI *et al.*, 2001). O nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) é um forte inibidor da nodulação, reduzindo em níveis muito baixos a concentração de ureídeos em leguminosas tropicais, de forma que a asparagina torna-se a forma de nitrogênio predominante nessas condições (PATE *et al.*, 1979). Sob a presença do  $\text{NO}_3^-$ , todos os estágios do processo de nodulação são inibidos, para uma maior ou menor extensão (CARROL; MATHEWS, 1990).

Quanto aos fatores bióticos, àqueles intrinsecamente relacionados a bactéria e ao hospedeiro, assim como a relação de ambas com o ambiente, definirão o efetivo de N biologicamente fixado na simbiose mutualística. Entre esses fatores, podem ser considerados os mais relevantes, o tipo de inóculo e a via de inoculação (BROCKWELL *et al.*, 1988), a seleção de cultivares apropriados que influencia decisivamente sobre as entradas de nitrogênio nos sistemas agrícolas (WANI; RUPELA; LEE, 1995), o manejo de pragas e doenças (JOHNSTONE; BARBETTI, 1987), a competitividade do rizóbio na rizosfera, a sobrevivência saprofítica no solo e a interação sinérgica e antagônica (STRALIOTTO ; RUMJANEK, 1999).

Embora o feijoeiro-comum seja caracterizado pelo baixo potencial de aproveitamento, essa associação com rizóbios pode gerar economias significativas na produção dessa cultura, com estimativas de fixação de N variando de 4 a 165  $\text{kg ha}^{-1}$  com média de 55  $\text{kg ha}^{-1}$  (GRAHAM *et al.*, 2003). Resultados mais recentes mostram que essa contribuição de N varia entre 20 e 40  $\text{kg ha}^{-1}$  a partir da inoculação com *R. tropici* (SANTANA *et al.*, 2018).

No feijoeiro, a formação de nódulos inicia-se no estágio V2 e a atividade de fixação em V3. Entre R5 e R6 ocorre um declínio no quantitativo de N fixado, e a senescência dos nódulos e término da atividade em R7 a R8 (OLIVEIRA *et al.*, 2018). A nitrogenase atinge o pico de atividade após a floração, sendo este, portanto, o pico de fixação; por outro lado, a nitrato redutase tem a eficiência máxima durante a fase de enchimento dos grãos. Dessa forma, o feijoeiro é mais beneficiado pela FBN nos estádios iniciais de desenvolvimento, enquanto a aplicação de adubos nitrogenados tem maior contribuição nos estádios finais da cultura (KUSDRA, 2002).

A FBN na cultura não é um padrão, podendo variar conforme o hábito de crescimento e o ciclo, entre outras. Geralmente, as cultivares de hábito de crescimento determinado e de maturação mais precoce são menos beneficiadas pelo processo de FBN em relação às contrastantes (CASSINI; FRANCO, 1988), possivelmente por apresentarem um menor tempo de exposição à FBN. A diversidade entre os seus genótipos é uma ferramenta fundamental para os programas de melhoramento da cultura, permitindo a obtenção de cultivares com características superiores.

### **2.3 Melhoramento genético do feijoeiro-comum**

O gênero *Phaseolus* tem como centro de origem o continente americano, com populações selvagens localizadas desde o Norte do México até o Norte da Argentina, entre altitudes de 500 e 2.000 m (DEBOUCK, 1986). São identificadas 55 espécies do gênero, destas, apenas cinco são cultivadas, sendo elas: o feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.), o feijão-de-lima (*Phaseolus lunatus*), o feijão-ayocote (*Phaseolus coccineus*), o feijão-tepari (*Phaseolus acutifolius*) e o *Phaseolus polyanthus* (EMBRAPA, 2000). O surgimento de raças locais é resultante da ampla área de ocorrência dessas populações, embora essa ocorrência também seja uma das causas da dificuldade de localização exata dos locais de domesticação desta cultura (FREITAS, 2006).

Embora circunde controvérsias, são considerados três centros de domesticação, o primeiro é a região central das Américas, no qual possivelmente originaram-se a maioria das cultivares de grãos pequenos, como o carioca; o segundo local é a região do sul dos Andes, especificamente o norte da Argentina e o sul do Peru, de onde possivelmente desenvolveram-se as cultivares com sementes maiores, como o jalo; e o terceiro centro de domesticação do feijão é a Colômbia (EMBRAPA, 2000). Em função da importância socioeconômica da cultura no país e da alta variabilidade genética entre os seus genótipos, os programas de melhoramento

visam a obtenção de cultivares que associem produtividade, adaptabilidade e tolerância a fatores de cunho biótico e abiótico.

As pesquisas acerca do melhoramento genético do feijoeiro iniciaram-se na década de 30 do século passado no Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), porém receberam maior ênfase a partir da década passada de 60 (RAMALHO, 2001). Os programas de melhoramento da cultura são conduzidos basicamente por instituições públicas como as universidades e a Embrapa Arroz e Feijão, o Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), a EPAMIG e o próprio IAC (BORÉM; CARNEIRO, 2015) e visam, sobretudo, o aumento da produtividade e da resistência às doenças, bem como a seleção de cultivares tolerantes a estresse hídrico. Outras características como a arquitetura das plantas e tempo de cocção também são objetivadas nos programas. A arquitetura é um caráter de grande importância na maximização da colheita mecanizada, e o tempo de cozimento é fator fundamental para a aceitação de uma cultivar de feijão pelos consumidores. Para a FBN, os estudos têm buscado genótipos que apresentam maiores afinidades com bactérias fixadoras de N (TSUTSUMI; BULEGON; PIANO, 2015).

O programa de melhoramento da Embrapa Arroz e Feijão obteve resultados significativos entre 1985 e 2006, com ganho estimado para produção de grãos do tipo carioca de 17,3 kg ha ano<sup>-1</sup> ou 0,72% ao ano e para o feijão tipo preto de 1,1% (25,2 kg ha<sup>-1</sup>). Avanços genéticos também foram obtidos na arquitetura da planta (2% ao ano), tolerância ao acamamento (2% ao ano) e na qualidade de grão (2,4% ao ano), atendendo o padrão de mercado para o tipo carioca, com grãos cor creme, com listra castanho-claro, fundo claro, sem halos e sem achatamento (FARIA *et al.*, 2013). O grão é julgado sob o ponto de vista do melhoramento considerando a qualidade comercial, culinária e nutricional sendo, todos estes, fundamentais na efetividade do programa. Em relação a FBN, embora novos estudos estejam sendo desenvolvidos, a quantificação exata do seu progresso não foi estimada, por historicamente tratar-se de uma característica pouco explorada na cultura.

Contudo, a seleção para rendimento de grãos em condições de inoculação produz indiretamente, cultivares com maior capacidade de fixação de nitrogênio à seleção em presença de adubação nitrogenada mineral (PEREIRA; BRAIDOTTI, 2001). A variabilidade genética entre os genótipos de feijão para a FBN é conhecida e identificada, todavia, a necessidade da realização de análises destrutivas dificulta o melhoramento, não permitindo a seleção direta (TSUTSUMI; BULEGON; PIANO, 2015). Dessa forma, esses métodos só podem ser utilizados em progênies e não em plantas individuais.

Estudos acerca do tema foram desenvolvidos na Europa na década de 40 do século passado, visando o aumento da nodulação e fixação de N em trevo (*Trifolium pratense*) e trevo subterrâneo (*Trifolium subterraneum*). E entre as décadas de 60 e 70 do século passado, objetivo similar foi proposto para as culturas da fava (*Vicia faba*), soja alfafa (*Medicago sativa*) e ervilha (*Pisum sativum*) (HERRIDGE; ROSE, 2000). Nesse mesmo período, o insucesso de muitos programas pode estar atrelado ao raso conhecimento e entendimento a respeito das informações genéticas básicas quanto às expressões das características desejadas.

No caso específico do feijoeiro-comum, linhagens elites para FBN chegaram a ser desenvolvidas pelo CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical) e pela Universidade de Wisconsin. Nos programas desenvolvidos na Universidade de Wisconsin, objetivando incremento no número de nódulos, foi constatado que a herdabilidade era de 0,30, sendo liberadas cinco linhagens melhoradas para FBN (BOHRER, 1996). Em testes realizados no Brasil, uma dessas linhagens, a WBR22 - 34 fixou duas vezes mais do que a cultivar padrão brasileira da época, Rio Tibagi, e 20% mais do que a Negro Argel, que em estudos anteriores havia sido identificada como cultivar de alta capacidade de fixação (HERRIDGE; DANSO, 1995). Todavia, em estudos posteriores, a eficiência não se repetiu, evidenciando a influência do ambiente na resposta à FBN. O entendimento dos efeitos gênicos que predominam no controle genético de um caráter, assim como da sua interação com o ambiente, é um fator primordial na condução eficiente do melhoramento.

## **2.4 Controle genético da FBN**

A FBN simbiótica é uma característica de herança quantitativa (GRAHAM, 1981), logo os métodos de melhoramento a serem empregados devem enfatizar a seleção entre diferentes progênies e em diferentes condições (anos e ambientes). A interação entre rizóbios e leguminosas é complexa, chegando a envolver mais de 50 genes bacterianos e mais de 40 genes vegetais (SIQUEIRA; SAFIR; NAIR, 1991).

Uma simbiose efetiva requer uma expressão coordenada de genes tanto da bactéria quanto da planta (VANCE ; LAMB, 2001). A nodulação ocorre após a estimulação miogênica das células corticais e periciclo com a exsudação de compostos orgânicos, incluindo, carboidratos, aminoácidos, além de compostos fenólicos (flavonoides, isoflavonoides e outros), que induzem a sintetização de moléculas sinalizadoras pelo rizóbio (SKORUPSKA *et al.*, 2006). A especificidade da interação depende dos compostos sintetizados e exsudados pela planta. Esses compostos atuam como indutores dos genes da nodulação, coletivamente

denominados genes Nod (KRISHNAN; KUO; PUEPPKE, 1995). Com a ativação desses genes, ocorre no microssimbionte a síntese de outros sinais, chamados fatores Nod, que são lipoquitooligossacarídeos (LCOs) com diversas substituições químicas (SKORUPSKA *et al.*, 2006). Os genes Nod são classificados como genes Nod estruturais e genes Nod regulatórios, cuja principal função é garantir a troca de sinais entre a bactéria e o hospedeiro.

Os fatores Nod induzem a deformação dos pelos radiculares, despolarização das membranas e flutuações nos níveis de cálcio intracelular das raízes, alterações no citoesqueleto das células radiculares, formação do cordão de pré-infecção, multiplicação das células corticais e desenvolvimento do nódulo (BARTSEV *et al.*, 2004). O ambiente interfere sobre a síntese dos fatores Nod, como observado na estirpe *Rhizobium tropici* CIAT 899, na qual produz 52 fatores Nod diferentes sob condições ácidas, e apenas 29 em pH neutro (MÓRON *et al.*, 2005).

Há ainda muitos genes e mecanismos regulatórios desconhecidos envolvidos na produção de fatores Nod (KANNENBERG; CARLSON, 2005) e estudos têm buscado identificar genes da planta envolvidos na nodulação (BUZAS; GRESSHOFF, 2007). Novas famílias de genes em leguminosas foram identificadas, envolvidas principalmente na nodulação e proteção dos nódulos, denominadas proteínas ricas em glicina, prolina e cisteína (SILVERSTEIN; GRAHAM; VANDENBOSCH, 2006). Foram identificados cerca de 100 genes presentes no DNA de leguminosas que ativam diferentes estádios durante a simbiose, com funções relacionadas à eficiência simbiótica (KUSTER *et al.*, 2007).

A FBN é uma característica controlada por vários genes, afetada substancialmente pelo ambiente, isto é, a herdabilidade para as características referentes a nodulação no feijoeiro-comum é baixa (PERREIRA *et al.*, 1993). Nesse sentido, nota-se a importância da avaliação de características que se correlacionam com a eficiência simbiótica e que estejam menos sujeitas ao efeito do ambiente, permitindo assim, a obtenção de genótipos superiores na relação com bactérias fixadoras de N (TSUTSUMI; BULEGON; PIANO, 2015). Alguns parâmetros diretamente relacionados com a FBN têm sido recomendados para programas de melhoramento, entre eles o peso de nódulos e o N total acumulado pela parte aérea (ALCANTARA *et al.*, 2009). No caso do feijoeiro, na década de 50 do século passado já haviam registros de que os genes com maior responsabilidade pela nodulação pareciam residir na planta hospedeira (VARGAS; HUNGRIA, 1997).

Baseando-se na soja, foi conduzido nos Estados Unidos um programa para identificar genes que restringissem a nodulação com os sorogrupos dominantes nos solos, possibilitando resposta à inoculação com estirpes mais eficientes, mas não tão competitivas quanto às

estabelecidas no solo, e como resultado, foram relatados três genes dominantes responsáveis pela restrição da nodulação,  $Rj_2$ ,  $Rj_2$  e  $Rj_2$  e um gene recessivo  $rj_1rj_1$ , determinando a não-nodulação com todos os sorogrupos. No campo, os genótipos que carregam o gene recessivo  $rj_1rj_1$  formam um nódulo a cada 1000 ou 1500 plantas. Todos esses genes são distintos em sua segregação, facilitando a construção de genótipos de soja, contendo uma ou todas as combinações possíveis (HUNGRIA *et al.*, 2000).

Ressalta-se que embora sejam contemplados grandes avanços, predomina-se uma lacuna ao que se refere a fixação biológica de nitrogênio na cultura do feijoeiro-comum, com um significativo número de cultivares desenvolvidas e lançadas, caracterizadas por altos índices produtivos e tolerâncias abióticas e bióticas, mas consideravelmente restritas e dispersas quanto ao potencial de FBN.

## REFERÊNCIAS

- ALCANTARA, R.M.C.M *et al.*, **Relações entre a contribuição da fixação biológica de nitrogênio e a duração do ciclo de diferentes genótipos de cultivos de leguminosas de grãos**. Documentos 197, Embrapa Meio-Norte, 2009. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/663936/relacoes-entre-a-contribuicao-da-fixacao-biologica-de-nitrogenio-e-a-duracao-do-ciclo-de-diferentes-genotipos-de-cultivos-de-leguminosas-de-graos>. Acesso em: 12 dez. 2023
- ARAUS, J. L.; CAIRNS, J. E. **Field high-throughput phenotyping: the new crop breeding frontier**. Trends in plant science, v. 19, n. 1, p. 52–61, 2014. DOI: 10.1016/j.tplants.2013.09.008.
- BACK, A. J. **Necessidade de irrigação da cultura de feijão no sul do estado de Santa Catarina**. Revista Ciência, Tecnologia e Ambiente, v.7, n. 1, p. 35-44. 2001.
- BARBOZA, T. O. C. et al. **Performance of vegetation indices to estimate green biomass accumulation in common bean**. AgriEngineering, v. 5, n. 2, p. 840–854, 2023. DOI: 10.3390/agriengineering5020052
- BARTSEV, A.; KOBAYASHI, H.; BROUGHTON, W.J. **Rhizobial signals convert pathogens to symbionts at the legume interface**. In: GILLINGS, M. AND HOLMES, A. Plant Microbiology (Ed.). Garland Science/BIOS Scientific, Abingdon, UK, p. 19–31, 2004. Disponível em: [http://students.aiu.edu/submissions/profiles/resources/onlineBook/Y6L7Y6\\_plant\\_microbiology.pdf#page=33](http://students.aiu.edu/submissions/profiles/resources/onlineBook/Y6L7Y6_plant_microbiology.pdf#page=33). Acesso em: 22 out. 2022.
- BAYARAA, B. et al. **Aplicabilidade de diferentes índices de vegetação para estimativa de biomassa de pastagens na região centro-norte da Mongólia**. Geocarto Int, v. 37, p. 7415–7430, 2022. DOI: 10.1080/10106049.2021.1974956
- BENIZRI, E.; BAUDOIN, E.; GUCKERT, A. **Root Colonization by Inoculated Plant Growth-Promoting Rhizobacteria**. Biocontrol Science and Technology, [S.L.], v. 11, n. 5, p. 557-574, out. 2001. DOI: 10.1080/09583150120076120
- BOHRER, T. R. J.; HUNGRIA, M. **Avaliação de cultivares de soja quanto à fixação biológica do nitrogênio**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 33, n. 6, p. 937-952, jun. 1998.
- BORÉM, A et al. **Studies on alternative means of legume inoculation: microbiological and agronomic appraisals of commercial procedures for inoculating soybeans with *Bradyrhizobium japonicum***. Australian Journal of Agricultural Research, v. 39, n. 6, p. 965-972, 1988. DOI: 10.1071/AR9880965.
- BUZAS, D. M.; GRESSHOFF, P. **Short- and long-distance control of root development by LjHAR1 during the juvenile stage of *Lotus japonicus***. Journal Of Plant Physiology, v. 164, n. 4, p. 452-459, abr. 2007. DOI: 10.1016/j.jplph.2006.03.006.

CARROL, B.J.; MATHEWS, A. **Nitrate inhibition of nodulation in legumes**. In: Greshoff, P. M. (ed.) *Molecular Biology of Symbiotic Nitrogen Fixation*, CRC Press, v.1, p. 159-180, 1990. DOI: 10.1201/9781351074742.

CARVALHO, J. P. S. et al. **Combining abilities of soybean progenies and *Bradyrhizobium* strains for biological nitrogen fixation**. *Crop Science*, v. 63, p. 29-43, 2022. DOI: 10.1002/csc2.20735.

CARVALHO, T.; FERREIRA, P.; HEMERLY, A. **Sugarcane Genetic Controls Involved in the Association with Beneficial Endophytic Nitrogen Fixing Bacteria**. *Tropical Plant Biology*, v. 4, p. 31–41, 2011. DOI: 10.1007/s12042-011-9069-2.

CASSINI, S.T.A.; FRANCO, M.C. **Fixação biológica do nitrogênio**. In: VIEIRA, C.; PAULA JÚNIOR, T.J.; BORÉM, A. (Eds.). *Feijão: aspectos gerais e cultura no Estado de Minas*, p. 153-180, 1998.

CHRISTOPHE, S. et al. **Plant N fluxes and modulation by nitrogen, heat and water stresses: a review based on comparison of legumes and non-legume plants**. In: SHANKER.; VENKATESWARLU, B. (Eds). *Abiotic Stress in Plants – Mechanism and Adaptations*, p. 79-118, 2011. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=RQmQDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA79&dq=CHRISTOPHE,+S.+et+al.+Plant+N+fluxes+and+modulation+by+nitrogen,+heat+and+water+stresses:+a+review+based+on+comparison+of+legumes+and+non-legume+plants.+In:+SHANKER.%3B+VENKATESWARLU,+B.+\(Eds\).+Abiotic+Stress+in+Plants+%E2%80%93+Mechanism+and+Adaptations,+Cro%3A%1cia,&ots=j3-xYezyu-&sig=Y3QLPNK0EKIRP7bzY5P6ajZHcg8#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=RQmQDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA79&dq=CHRISTOPHE,+S.+et+al.+Plant+N+fluxes+and+modulation+by+nitrogen,+heat+and+water+stresses:+a+review+based+on+comparison+of+legumes+and+non-legume+plants.+In:+SHANKER.%3B+VENKATESWARLU,+B.+(Eds).+Abiotic+Stress+in+Plants+%E2%80%93+Mechanism+and+Adaptations,+Cro%3A%1cia,&ots=j3-xYezyu-&sig=Y3QLPNK0EKIRP7bzY5P6ajZHcg8#v=onepage&q&f=false). Acesso em: 23 out. 2022.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Relatório de Insumos Agropecuários: Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento**. 2023. Disponível em: <https://consultaweb.conab.gov.br/consultas/consultaInsumo.do?method=acaoListarConsulta>. Acesso em: 26 dez. 2023.

DEBOUCK, D.G. **Primary diversification of Phaseolus in the Americas: three centers?** *Plant Genetic Resources Newsletter*, v.67, p.2-8, 1986. Disponível em: [https://www.biodiversityinternational.org/fileadmin/\\_migrated/uploads/tx\\_news/Plant\\_Gnetic\\_Resources\\_Newsletter\\_No\\_67.pdf#page=4](https://www.biodiversityinternational.org/fileadmin/_migrated/uploads/tx_news/Plant_Gnetic_Resources_Newsletter_No_67.pdf#page=4). Acesso em: 11 out. 2022.

DELNERI, A. L.B. **Caracterização de plantas transgênicas expressando a leghemoglobina de soja no interior de mitocôndrias e cloroplastos**. 2001. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Genética e Melhoramento de Plantas, Esalq/USP, Piracicaba, 2001. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11137/tde-20181127-155327/publico/DelneriAnaLuciaBonna.pdf>. Acesso em: 14 out. 2022.

DEPEC – Departamento de pesquisas e estudos econômicos do Bradesco. 2017. *Feijão*. [s.l.]: Depec, jun.

DIXON, R.; KAHN, D. Genetic regulation of biological nitrogen fixation. *Nature Reviews Microbiology*, [S.L.], v. 2, n. 8, p. 621-631, ago. 2004. DOI: 10.1038/nrmicro954.

EMBRAPA ARROZ E FEIJÃO. **Origem e história do feijoeiro comum e do arroz**, 2000. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/164370/1/CNPAF-2000-fd.pdf>. Acesso em: 13 out. 2022.

FARIA, L. C. et al. **Genetic progress during 22 years of improvement of carioca-type common bean in Brazil**. *Field Crops Research*, [S.L.], v. 142, p. 68-74, fev. 2013. DOI: 10.1016/j.fcr.2012.11.016.

FARIA, L. C. et al. **Genetic progress during 22 years of improvement of carioca type common bean in Brazil**. *Field Crops Research*, v. 142, p. 68-74, fev. 2013. DOI: 10.1016/j.fcr.2012.11.016.

FREITAS, F.O. **Evidências genético-arqueológicas sobre a origem do feijão comum no Brasil**. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v. 41, n. 7, p.1199-1203, jul. 2006.

GRAHAM, P. et al. **Addressing edaphic constraints to bean production: the bean/cowpea CRSP project in perspective**. *Field Crops Research*, [S.L.], v. 82, n. 179, p. 82:179–192, 2003. DOI: 10.1016/S0378-4290(03)00037-6.

GRAHAM, P. H. **Some problems of nodulation and symbiotic nitrogen fixation in *Phaseolus vulgaris* L.: a review**. *Field Crops Research*, v. 4, p. 93-112, 1981. DOI: 10.1016/0378-4290(81)90060-5.

HERRIDGE, D. F.; DANSO, S. K. A. Enhancing crop legume N<sub>2</sub> fixation through selection and breeding. *Plant and Soil*, v. 174, n. 1-2, p. 51-82, 1995.

HERRIDGE, D.F; ROSE, I. Breeding for Enhanced nitrogen fixation in crop legumes. *Field Crops Research*, v 65, p. 229-248, 2000.

HUNGRIA, M *et al.* **Isolation and characterization of new efficient and competitive bean (*Phaseolus vulgaris* L.) rhizobia from Brazil**. *Soil Biology & Biochemistry*, v. 32, n. 11-12, p. 1515-1528, 2000.

HUNGRIA, M. et al. **Contribution of biological nitrogen fixation to the N nutrition of grain crops in the tropics: the success of soybean (*Glycine max* L. Merr.) in the South America**. In: SINGH, R. P.; SHANKA, N.; JAIWAL, P.K. (Eds.). *Nitrogen nutrition in plant productivity*. Houston: Studium Press/LLC, p.43-93, 2006.

HUNGRIA, M; VARGAS, M.A.T. **Environmental factors impacting N<sub>2</sub> fixation in legumes grown in the tropics, with an emphasis on Brazil**. *Field Crop*, v. 65, p. 151- 164, 2000. Disponível em: <http://www.bashanfoundation.org/contributions/Hungria-M/2000.-Hungria-FCR.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2022.

JOHNSTONE, G.R.; BARBETTI, M.J. **Impact of Fungal and Virus Diseases on Pasture**. East Melbourne, Australia: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization. 1987. Disponível em: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201302679851>. Acesso em: 14 out. 2022.

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

- KAMFWA, K.; CICHY, K.A; KELLY, J.D. **Genome-wide association analysis of symbiotic nitrogen fixation in common bean**. Theoretical and Applied Genetics, v. 128, p. 1999–2017, 2015. DOI: DOI: 10.1007/s00122-015-2562-5.
- KANNENBERG, E.; CARLSON, R.W. **An abundance of Nod factors**. Chemistry & Biology, v. 12, p. 956–958, 2005. DOI: 10.1016/j.chembiol.2005.09.004.
- KASCHUK, G. et al. **Are the rates of photosynthesis stimulated by the carbon sink strength of rhizobial and asbuscular symbioses?** Soil Biology & Biochemistry, v.41, p.1233-1244, 2009. DOI: 10.1016/j.soilbio.2009.03.005
- KRISHNAN, H. B.; KUO, C. I.; PUEPPKE, S. G. **Elaboration of flavonoid-induced proteins by the nitrogenfixing soybean *Rhizobium fredii* is regulated by both nodD1 and nodD2, and is dependent on the cultivar-specificity locus, nolXTWBTUV**. Microbiology, v. 141, p. 2245- 2251, 1995. Acesso em: 27 dez. 2022. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=63a38246c5ea0468d5a1dea62dd97e5c56cf520>.
- KUSDRA, J. F. **Nodulação do feijoeiro e fixação biológica do nitrogênio em resposta à microbiolização das sementes e à aplicação de micronutrientes**. Curitiba, 2002. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/26563/T%20-%20KUSDRA,%20JORGE%20FERREIRA.pdf?sequence=1>. Acesso em: 25 out. 2021.
- KUSTER, H. et al. **Identification and expression regulation of symbiotically activated legume genes**. Phytochemistry, v. 68, p. 8-18, 2007. DOI: 10.1016/j.phytochem.2006.09.029.
- LEAL, F. T. *et al.*, **Use efficiency and responsivity to nitrogen of common bean cultivars**. Ciência e Agrotecnologia, v. 43:e004919, p. 1-13, 2019. DOI: 10.1590/1413-7054201943004919.
- MATTHAY, M.A *et al.* **Acute respiratory distress syndrome**. Nature Reviews Disease Primers, v. 5, n. 18, 2019. DOI: 10.1038/s41572-019-0069-0
- MENDES, I. et al. **Fixação biológica de nitrogênio em soja: bom para a qualidade do solo, bom para o bolso do agricultor e para o Brasil**, 2010. Disponível em: <http://www.portaldiadecampo.com.br>. Acesso em: 20 out. 2022
- MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Fixação Biológica de Nitrogênio. Microbiologia e Bioquímica do Solo**, 2ª edição, Editora UFLA, 2006, 729 p,
- MÓRÓN, B. et al. **Low pH changes the profile of nodulation factors produced by *Rhizobium tropici* CIAT899**. Chemistry & Biology, v. 12, p. 1029–1040, set. 2005. DOI: 1074552105002310.
- MORTINHO, E. C. et al. **Co-Inoculations with Plant Growth-Promoting Bacteria in the Common Bean to Increase Efficiency of NPK Fertilization**. Agronomy, [S.L.], v. 12, n. 6, p. 1325, 30 maio 2022. DOI: 10.3390/agronomy12061325.
- OLIVEIRA, M. G. de C. et al. **Conhecendo a fenologia do feijoeiro e eus aspectos fitotécnicos**. Brasília: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de->

publicacoes/-/publicacao/1085830/conhecendo-a-fenologia-do-feijoeiro-e-seus-aspectos-fitotecnicos. Acesso em: 20 out. 2022.

OLIVEIRA, M. G. de C. et al. **Conhecendo a fenologia do feijoeiro e seus aspectos fitotécnicos**. Brasília: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085830/conhecendo-a-fenologia-do-feijoeiro-e-seus-aspectos-fitotecnicos>. Acesso em: 20 out. 2022.

PATE, J. S.; LAYZELL, D. B.; ATKINS, C. A. **Economy of Carbon and Nitrogen in a Nodulated and Nonnodulated (NO<sub>3</sub>- grown) Legume**. *Plant Physiology*, v.64, n. 6, p. 1083-1088, 1 dez. 1979. DOI: 10.1104/pp.64.6.1083.

PEREIRA, P.A.A et al. **Selection for increased nodule number in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.)**. *Plant Soil*, v. 148, p. 203-209, 1993. DOI:10.1007/BF00012858.

PORTES, T.A. Ecofisiologia. *In: Cultura do feijoeiro comum no Brasil*. R.S. ARAÚJO, C.A. RAVA, L.F. STONE, M.J.O. ZIMMERMANN (Eds). Potafos, p.101-137, 1996.

RAMALHO, M.A.P. **Melhoramento genético de plantas no Brasil: situação atual e perspectivas**. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MELHORAMENTO DE PLANTAS*, 1., 2001, Goiânia. **Anais [...]** Goiânia: EMBRAPA, 2001.

ROSOLEM, C.A.; MARUBAYASHI, O.M. **Seja o doutor do seu feijoeiro**. Piracicaba: POTAFÓS, 1994. 16 p. (Informações Agronômicas, 68). Disponível em: [https://www.npct.com.br/npctweb/npct.nsf/article/BRS-3143/\\$File/Seja%20Feijoeiro.pdf](https://www.npct.com.br/npctweb/npct.nsf/article/BRS-3143/$File/Seja%20Feijoeiro.pdf). Acesso em: 20 de out. 2022.

SANTANA, M. V. et al. **Redução da adubação nitrogenada em cobertura de feijoeiro com *Rhizobium tropici***. *Global Science and Technology*, v.11, n. 2, 2018. Disponível em: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=BR2022N00112>. Acesso em: 21 out. 2022.

SCHUBERT, M. **Carbon partitioning in nitrogen-fixing root nodules**. 2002. 149 f. Tese (Doutorado) - Universität zu Göttingen, Göttingen.

SHIBATA, H. et al. **Nitrogen footprints: Regional realities and options to reduce nitrogen loss to the environment**. *Ambio*, v. 46, n. 2, p. 129–142, 2017. DOI: 10.1007/s13280-016-0815-4.

SILVA, F. B.; BRUZI, A. T.; RAMALHO, M. A. P. **Precisão experimental na avaliação de cultivares de feijão**. *In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA DE FEIJÃO*, Viçosa, 2002. **Anais...** Viçosa: UFV, 2002. p.288-291.

SILVERSTEIN, K. A, T.; GRAHAM, M. A.; VANDENBOSCH, K.A. **Novel paralogous gene families with potential function in legume nodules and seeds**. *Current Opinion in Plant Biology*, v.9, n.2 p. 142 - 146, 2006. DOI: 10.1016/j.pbi.2006.01.002.

SINCLAIR, T.R.; VADEZ, V. **The future of grain legumes in cropping systems**. *Crop & Pasture Science*, v. 63, p. 501-512, 2012. DOI: 10.1071/CP12128

SIQUEIRA, J. O.; SAFIR, G. R.; NAIR, M. G. **Stimulation of vesicular-arbuscular mycorrhiza formation and growth of white clover by flavonoid compounds. The new phytologist**, v. 118, n. 1, p. 87–93, 1991. DOI: 10.1111/j.1469 8137.1991.tb00568.x.

SKORUPSKA, A. et al. **Exopolysaccharides: genetic control and symbiotic functions.**

SNAK, C.; SALINAS, A.O.D. Phaseolus. In: **Flora do Brasil 2020 em construção.** Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2020. Disponível em:  
<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/listaBrasil/FichaPublicaTaxonUC/FichaPublicaTaxonUC.do?id=FB79132>. Acesso em: 20 out. 2022.

SORATTO, R. P. et al. **Nutrient extraction and exportation by common bean cultivars under different fertilization levels: i - macronutrients.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, [S.L.], v. 37, n. 4, p. 1027-1042, ago. 2013. DOI: 10.1590/s0100-06832013000400020.

SORATTO, R. P.; CATUCHI, T. A.; SOUZA, E. D. F. C. D.; GARCIA, J. L. N. **Plant Density and Nitrogen Fertilization on Common Bean Nutrition and Yield.** Revista Caatinga, v. 30, n. 3, p. 670-678, 2017. DOI: 10.1590/1983-21252017v30n315rc.

SOUSA, M. A. et al. **Productivity and Economics of Inoculated Common Bean as Affected by Nitrogen Application at Different Phenological Phases.** Journal Of Soil Science and Plant Nutrition, [S.L.], v. 20, n. 4, p. 1848-1858, 7 maio 2020. DOI:10.1007/s42729-020-00256-4.

STRALIOTTO, R.; RUMJANEK, N.G. **Biodiversidade do rizóbio que nodula o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) e os principais fatores que afetam a simbiose.** Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 1999. 51 p. (Embrapa-CNPAB. Documentos, 94). Disponível em:  
<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/624353>. Acesso em: 21 out. 2022.

TAIZ *et al.* **Fisiologia Vegetal.** 6 Ed, Artmed, Porto Alegre, 2017, 848 p.

TSUTSUMI, C.; BULEGON, L.G.; PIANO, J.T. **Melhoramento Genético do Feijoeiro: avanços, perspectivas e novos estudos, no âmbito nacional.** Nativa, v. 3, n. 3, p. 217-223, 29 set. 2015. DOI: 10.14583/2318-7670.v03n03a12.

VANCE, C.P.; LAMB, J.F.S. **Application of biochemical studies to improving nitrogen fixation. Jornal australiano de agricultura experimental.** Australian Journal of Experimental Agriculture, v. 41, n. 3, p. 403-416, 2001. DOI: 10.1071/EA00007.

VARGAS, M. A. T.; HUNGRIA, M. (Ed.). **Biologia dos solos dos cerrados.** Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1997. 524 p.

VENÂNCIO, L. P. et al. **Potential use of spectral vegetation indices for green maize biomass estimation based on their relationship with the sub-pixel fraction of photosynthetic vegetation.** AgriEngineering, v. 236, p. 1-14 2020. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106155

VIEIRA, C.; JÚNIOR, T. J. P.; BORÉM, A. **Feijão.** 2 ed. Viçosa: UFV - Universidade Federal de Viçosa, 2006. 600 p.

WANDER, A. E. **Produção e consumo de feijão no Brasil, 1975-2005**. Informações Econômicas, v. 37, n. 2, p. 7-21, 2007. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/211059>. Acesso em: 26 out. 2022.

WANI, S.P.; RUPELA, O.P.; LEE, K.K. **Sustainable agriculture in the semi-arid tropics through biological nitrogen fixation in grain legumes**. Plant Soil, v.174, n. 1/2, p. 29-49, 1995. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/42947548>. Acesso em: 15 set. 2022.

YAN, Y. et al. Global transcriptional analysis of nitrogen fixation and ammonium repression in root-associated *Pseudomonas stutzeri* A1501. BMC Genomics, v.11, n. 11, p.1-13, 2010. DOI: 10.1186/1471-2164

**SEGUNDA PARTE – ARTIGOS\***

## ARTIGO 1: CAPACIDADE COMBINATÓRIA DE CULTIVARES DE FEIJÃO PARA A FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO

### RESUMO

Devido à variabilidade do feijoeiro-comum quanto à eficiência da fixação biológica de nitrogênio (FBN), enfatiza-se a importância do melhoramento genético visando esse caráter, selecionando estirpes e cultivares mais responsivas. Logo, objetivou-se avaliar a capacidade combinatória de cultivares de feijoeiro-comum para a FBN, inoculado com diferentes estirpes de *Rhizobium*, bem como comparar a eficiência de estirpes selecionadas com o potencial de aplicação como inoculante. O trabalho foi conduzido inicialmente em casa de vegetação, na qual foram avaliadas 15 cultivares de feijoeiro-comum e três estirpes distintas de *Rhizobium* e dois tratamentos controles, com N – mineral e sem inoculação e sem N-mineral e sem inoculação, em blocos casualizados completos, com quatro repetições. No florescimento pleno foi avaliado o índice SPAD, massa da matéria seca da parte aérea e radicular, relação de nódulos viáveis, matéria seca de nódulos e N total nas folhas. Por meio de uma análise dialélica, determinaram-se as capacidades gerais e específicas de combinação, selecionando as cultivares BRS Esteio, BRS FC 402, BRS FC 414, BRS FP403, Pérola, BRSMG Uai e BRSMG Zape e a estirpe UFLA 02-100, como superiores. Estas foram avaliadas à campo, em Lavras e Carrancas, no estado de MG, em blocos casualizados completos e arranjo fatorial, com quatro repetições e dois tratamentos controle. Foram avaliadas a matéria seca da parte aérea, radicular e de nódulos, número de vagens, peso de cem grãos e produtividade de grãos. Os dados foram submetidos a análise de variância individual e conjunta, e as médias quando significativas, agrupadas pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). A análise dialélica entre as cultivares e estirpes de *Rhizobium* revelou a predominância dos efeitos aditivos nas características relacionadas à FBN. Existe variabilidade entre os genótipos de feijoeiro-comum, indicando potencial ganho genético na seleção para aumentar a capacidade de FBN. A inoculação com *Rhizobium* promove incrementos na produtividade de forma equivalente à adubação mineral. A estirpe UFLA 02-100 tem potencial para uso como inoculante na cultura do feijoeiro-comum.

Palavras-chave: Nodulação. Rizóbios. Melhoramento de plantas. Produtividade de grãos. *Phaseolus vulgaris*.

## ARTIGO 1: COMBINING ABILITY OF COMMON BEAN CULTIVARS FOR BIOLOGICAL NITROGEN FIXATION

### ABSTRACT

Due to the variability of common bean regarding the efficiency of biological nitrogen fixation (BNF), the importance of plant breeding programs targeting this trait is emphasized. This involves the selection of strains and cultivars that are more responsive. The purpose was to evaluate the combining ability of common bean cultivars for BNF, inoculated with different strains of *Rhizobium*, as well as to compare the efficiency of selected strains with the potential for application as inoculants. The study was initially conducted in a greenhouse, where 15 common bean cultivars and three distinct strains of *Rhizobium* were evaluated, with two control: mineral N with and without inoculation, and no mineral N and no inoculation, in completely randomized blocks design with four replications. At flowering, the SPAD index, aerial biomass dry matter and root parts, viable nodule ratio, dry matter of nodules, and total N in the leaves were assessed. Through diallel analysis, general and specific combining abilities were determined, selecting, BRS Esteio, BRS FC 402, BRS FC414, BRS FP403, Pérola, BRSMG Uai, BRSMG Zape, and strain UFLA 02-100 as superiors. These were evaluated in the field, in Lavras and Carrancas, MG, in completely randomized blocks design with a factorial arrangement, four replications, and two control. The dry matter of the aboveground, root, and nodules, number of pods, weight of one hundred seeds, and grain yield were assessed. Data were subjected to individual and joint variance analysis, and means, when significant, were grouped by the Scott-knott test ( $p < 0.05$ ). Diallel analysis between cultivars and *Rhizobium* strains revealed the predominance of additive effects in traits related to BNF. There is variability among common bean genotypes, indicating potential genetic gain in selection to increase the BNF capacity. *Rhizobium* inoculation promotes productivity increases equivalent to mineral fertilization. Strain UFLA 02-100 has the potential for use as an inoculant in common bean cultivation.

Keywords: Nodulation. Rhizobia. Plant breeding. Grain yield. *Phaseolus vulgaris*.

## 1 INTRODUÇÃO

O feijoeiro-comum sendo uma leguminosa nodulífera possui o potencial de associar-se com bactérias fixadoras de N, obtendo-se este nutriente a partir da simbiose mutualística com rizóbios, por meio da fixação biológica (FBN). Para a cultura, a simbiose ocorre com bactérias do gênero *Rhizobium* de pelos menos 12 espécies (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006), podendo também ser nodulado por *Burkholderia* spp. (MOREIRA; TIEDJE; MARSH, 2002), sob baixa especificidade do hospedeiro, o que caracteriza a promiscuidade do feijoeiro na simbiose com bactérias diazotróficas de diferentes gêneros (MOURA *et al.*, 2022).

A baixa especificidade de interação com bactérias simbiontes reduz a efetividade nos ganhos, uma vez que, grande parte dessas espécies, embora competitivas no processo de nodulação, apresentam baixa eficiência na FBN (REINPRECHT *et al.*, 2020; SHAMSELDIN; VELÁZQUEZ, 2020). Nesta condição, altas doses de nitrogênio mineral tornam-se indispensáveis para altas produtividade. Por seu turno, a adubação mineral com altas doses de N aumenta significativamente os custos de produção, contribuindo para o aumento dos impactos ambientais com adubação excedente, além de inibir a associação simbiótica da FBN (REINPRECHT *et al.*, 2020).

A contribuição da FBN na cultura é condicionada em função do genótipo e das bactérias associadas. O feijoeiro-comum caracteriza-se pela alta variabilidade genética entre os seus genótipos associada à FBN (BARRON *et al.*, 1999; BUTTERY; PARK; BERKUM, 1997; HERRIDGE; REDDEN, 1999; PEREIRA *et al.*, 1993). Ademais, estudos apontam que a resposta à FBN também é influenciada pelo hábito de crescimento das cultivares (WILKER *et al.*, 2019) e pela duração do ciclo (RUSCHEL *et al.*, 1982), sendo verificada diferença entre os genótipos na sensibilidade de nodulação e potencial de FBN (FRANCO *et al.*, 2002; MILCHESKI *et al.*, 2022).

Em relação as bactérias, estudos relatam a baixa competitividade com rizóbios nativos do solo em muitas espécies, influenciando diretamente sobre a capacidade de nodulação em condições limitantes de N (PELEGRIN *et al.*, 2009). A seleção de estirpes mais eficientes e competitivas é um dos fatores que contribuem para superar as limitações da FBN no feijoeiro. Historicamente, o incremento na capacidade de FBN não é um caráter selecionado nos programas de melhoramento do feijão, sendo este de difícil fenotipagem e destrutivo (KAMFWA; CICHY; KELLY, 2015). Possivelmente, o processo de domesticação da cultura resultou na redução da diversidade para esse caráter (CECCATTO *et al.*, 1998).

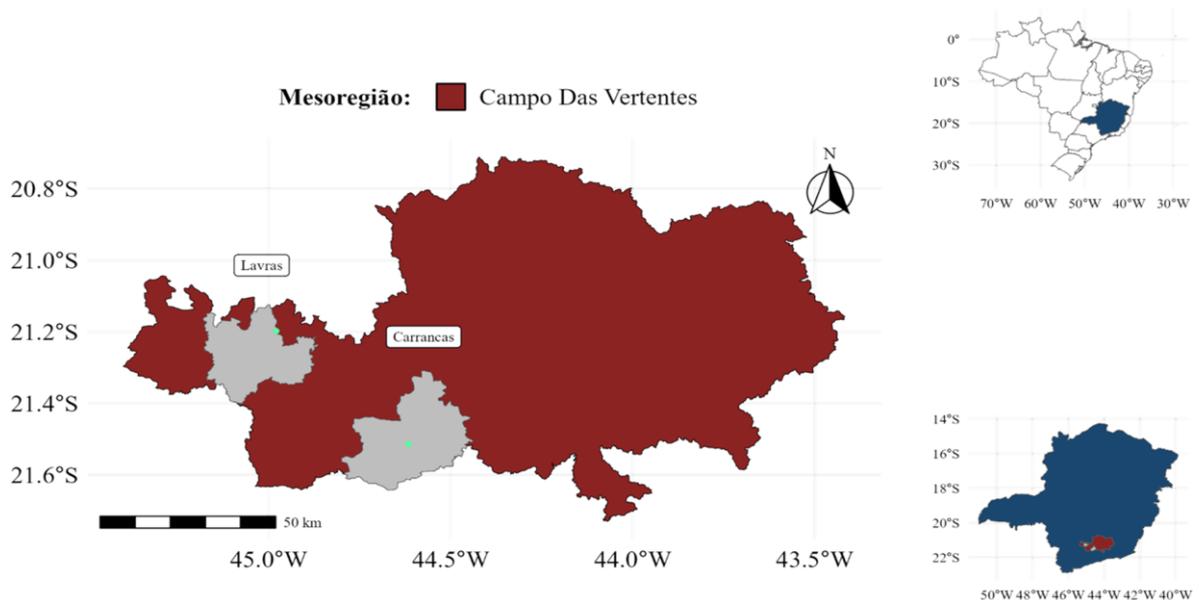
Diversos estudos mostram que os efeitos aditivos são predominantes na herança da capacidade da fixação biológica de nitrogênio, evidenciando que a sua otimização está atrelada a seleção de cultivares de feijoeiro-comum superiores para este caráter. Contudo, esses resultados ainda são escassos. Portanto, objetivou-se avaliar a capacidade combinatória de cultivares de feijoeiro-comum para à FBN, inoculado com diferentes estirpes de *Rhizobium*, bem como comparar a eficiência de estirpes selecionadas com potencial de aplicação como inoculante.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Localização e implantação dos experimentos

Os experimentos conduzidos em condições controladas foram conduzidos no laboratório de Microbiologia e Bioquímica do Solo, do Departamento de Ciência do Solo e em casa de vegetação, do Departamento de Agricultura, da Universidade Federal de Lavras (UFLA). A campo, as áreas experimentais estão localizadas nos municípios de Lavras-MG (Fazenda Experimental da UFLA - Centro de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Agropecuária - Fazenda Muquém) e em Carrancas-MG (Figura 1).

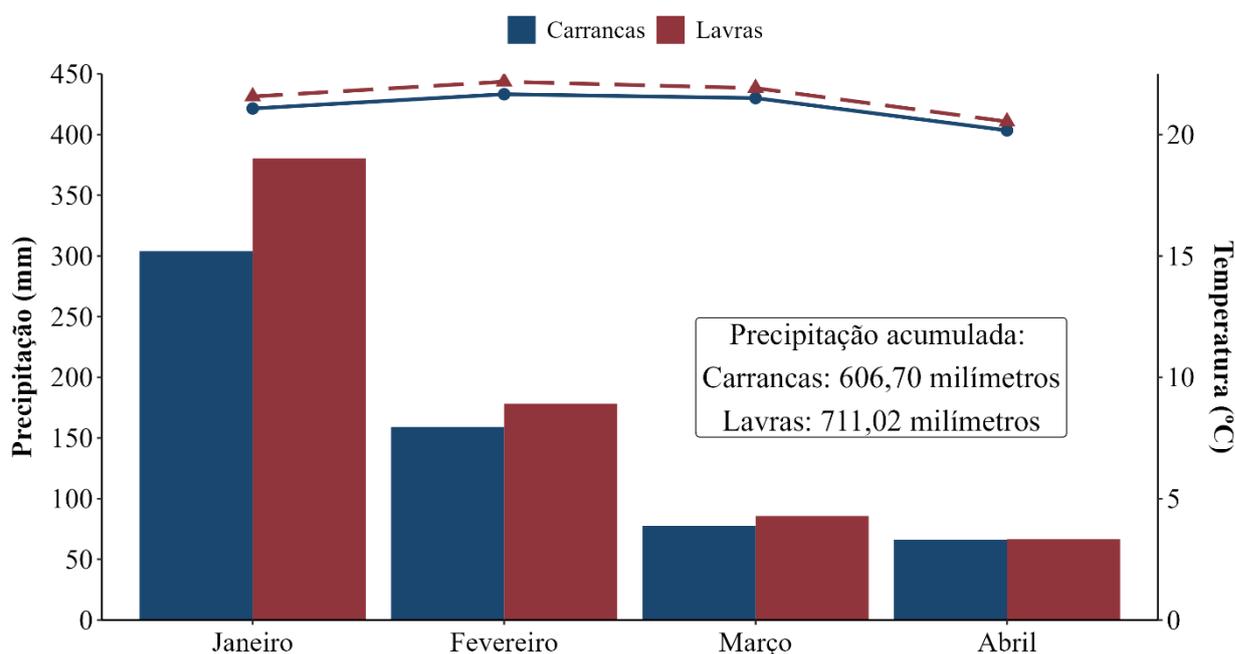
Figura 1- Localização geográfica das áreas de implantação dos experimentos a campo.



Fonte: Da autora (2024)

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é definido como *Cwa*, temperado chuvoso (mesotérmico), com inverno seco e verão chuvoso, subtropical (DANTAS; CARVALHO; FERREIRA, 2007). Os dados meteorológicos de precipitação e temperaturas médias do período de condução dos experimentos a campo são apresentados na figura 2.

Figura 2 – Dados meteorológicos dos municípios de Carrancas e Lavras entre janeiro e abril de 2023.



Fonte: Nasa Power (2024).

## 2.2 Cultivares de feijoeiro-comum e estirpes de *Rhizobium* avaliadas

Para a implantação dos experimentos em casa de vegetação e avaliação da capacidade combinatória para FBN, foram utilizadas 15 cultivares comerciais de feijão-comum, recomendadas para o cultivo na região, com distinções quanto ao hábito de crescimento, grupo varietal e ciclo (Tabela 1).

Para a inoculação, foram utilizadas três estirpes de *Rhizobium*, a CIAT 899, descrito por Esperanza Martinez-Romero (1971) e aprovada pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), para o uso como inoculante no feijoeiro-comum; e duas provenientes de seleção do laboratório de Microbiologia e Bioquímica do Solo – UFLA (UFLA 02-100 e UFLA 02-127), pertencentes ao acervo do SBMPBS/UFLA (Setor de Biologia, Microbiologia e Processos Biológicos da Universidade Federal de Lavras), descritas por PEREIRA *et al.*,

(1998) (Tabela 2). Todas as estirpes testadas foram isoladas de nódulos de feijoeiro e mantiveram, desde então, sua estabilidade genética com relação às características relacionadas à simbiose eficiente com o feijoeiro-comum (OLIVEIRA, 2021).

Tabela 1- Cultivares de feijão-comum avaliadas quanto à capacidade combinatória com estirpes de *Rhizobium*

Cultivar	Grupo varietal	Hábito de crescimento	DPF <sup>1</sup>	DMF <sup>1</sup>
BRSMG Amuleto	Carioca	Indeterminado/ III	43	87
BRSMG Zape	Carioca	Indeterminado/ II	42	90
BRS Madrepérola	Carioca	Indeterminado/ III	46	85
Pérola	Carioca	Indeterminado/ III	46	90
BRSMG Uai	Carioca	Indeterminado/ II	46	78
BRS FC402	Carioca	Indeterminado/ II	37	85
BRS Estilo	Carioca	Indeterminado/ II	44	83
BRS FC406	Carioca	Indeterminado/ II	36	86
BRS FC414	Carioca	Indeterminado/ II	45	91
BRS FC104	Carioca	Indeterminado/ III	29	63
BRS FC409	Carioca	Indeterminado/ II	42	86
BRSMG Marte	Vermelho	Indeterminado/ II	34	78
Ouro vermelho	Vermelho	Indeterminado/ II	38	80
BRS Esteio	Preto	Indeterminado/ II	44	90
BRS FP403	Preto	Indeterminado/ II	43	86

<sup>1</sup>Tempo médio. DPF: Dias para florescimento. DMF: Dias para maturação fisiológica.

Fonte: Da autora (2024).

Tabela 2 – Identificação e origem das estirpes de *Rhizobium* para inoculação na cultura do feijoeiro-comum.

Espécie	Designação original	Instituição
<i>R. etli</i>	UFLA 02-100	Universidade Federal de Lavras
<i>R. leguminosarum</i> bv <i>phaseoli</i>	UFLA 02-127	Universidade Federal de Lavras
<i>R. tropici</i>	CIAT 899 (=SEMIA 4077)	Universidade Nacional Autônoma do México Embrapa University of Minnesota

Fonte: Adaptado de Ferreira *et al.*, (2009).

### 2.3 Quantificação do número de células viáveis de rizóbios no solo

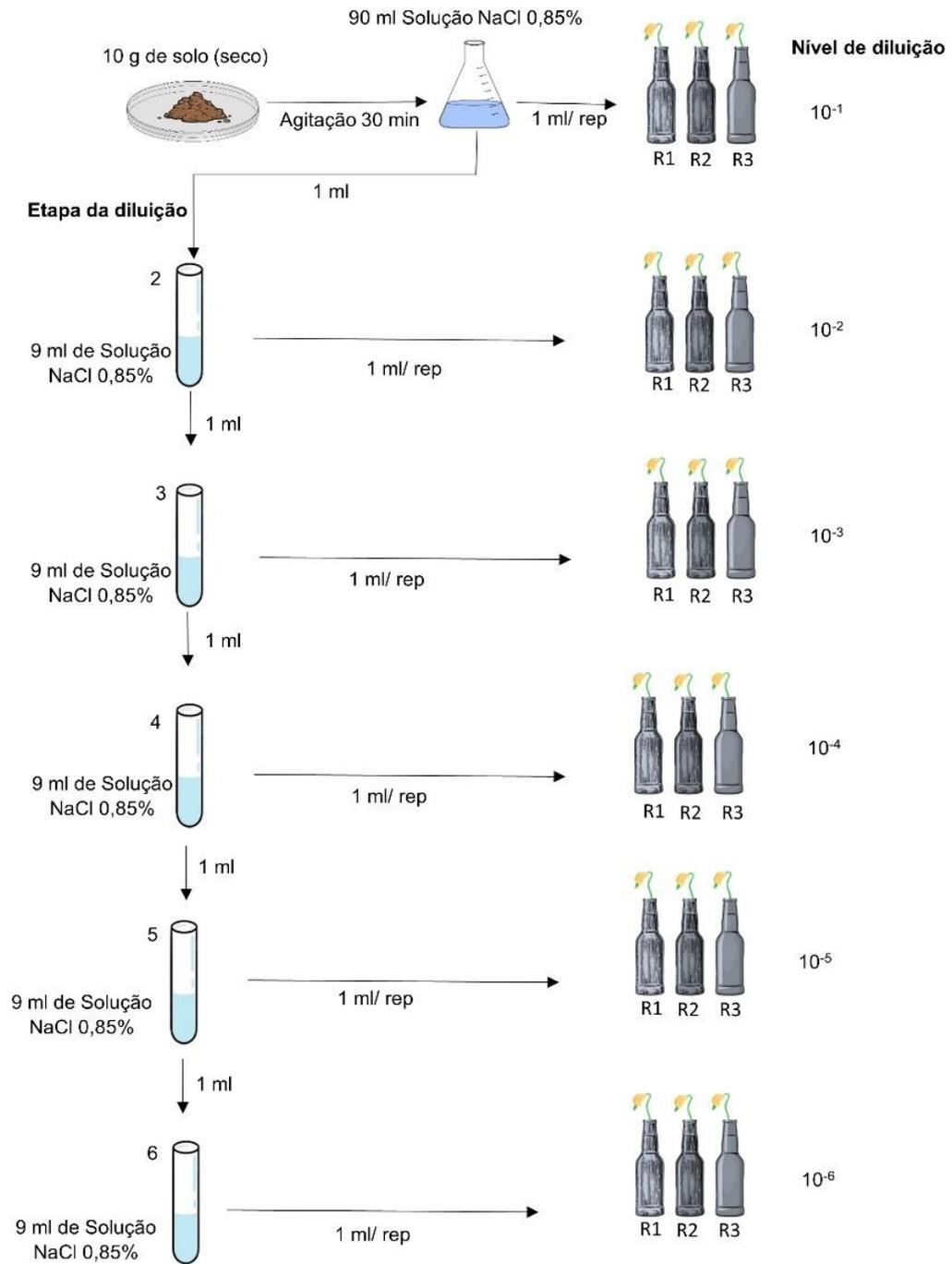
Previamente à semeadura de cada experimento, a população nativa de rizóbio do solo foi quantificada pela técnica do Número Mais Provável (NMP), considerando-se positivo para presença e negativo para ausência de nódulos, em cada diluição, utilizando-se a tabela de McCrady (DÖBEREINER; BALDANI; BALDANI, 1995). Os tratamentos foram atribuídos de forma inteiramente casualizada (DIC), em arranjo fatorial, constituídos de seis diluições,

número de amostras coletadas, locais e três tratamentos adicionais (com N, sem N e sem inoculação, e com inoculação),  $(6 \times A \times L) + 3$ , com três repetições. A inoculação do tratamento controle adicional foi realizada com a estirpe comercial CIAT 899, no volume de 1 ml semente<sup>-1</sup>. Ressalta-se que foi realizada a esterilização de todo o material utilizado no experimento, em autoclave à 360 °C.

Para o experimento conduzido em casa de vegetação, utilizou-se como planta-isca a cultivar de feijão Ouro Vermelho e a campo, a cultivar Pérola, não havendo distinções quanto a finalidade e aplicação. Antes da semeadura, as sementes foram desinfestadas e pré-germinadas em placa de Petri, em estufa, à temperatura ambiente. A desinfestação foi realizada com a imersão em álcool etílico 70% por 30 segundos, seguida por imersão em solução aquosa de hipoclorito de sódio 3% durante dois minutos e posteriormente, a submersão em água destilada, reposta por seis vezes, sucessivamente.

Após a germinação, as plântulas foram transferidas para garrafas âmbar revestidas por papel alumínio (FLORENTINO *et al.*, 2009), contendo 500 ml de solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950), com  $\frac{1}{4}$  de força para os tratamentos sem N. Procedeu-se com amostragem do solo, obtendo-se três e duas amostras compostas, respectivamente ao experimento de casa de vegetação e campo. As amostras foram submetidas a sucessivas diluições seriadas, de  $10^{-1}$  a  $10^{-6}$  a partir de 10 g do solo para 90 ml de solução salina de NaCl a 0,85% e mantido sob agitação constante durante 30 minutos a 125 rpm. A inoculação consistiu em uma alíquota de 1 ml de cada uma das diluições (Figura 3). Após 21 dias de crescimento, foi avaliada a presença ou ausência de nódulos para estimar o número mais provável (NMP) de nódulos formados por bactérias fixadoras de nitrogênio no feijoeiro-comum.

Figura 3- Esquema da diluição utilizada para estimar o número mais provável de células de rizóbio nas amostras de solo.



Fonte: Da autora (2024).

## 2.4 Experimento em casa de vegetação

Os tratamentos foram atribuídos no delineamento de blocos casualizados completos (DBCC), em esquema fatorial (3 x 15) + 2, sendo três estirpes de *Rhizobium*, 15 cultivares de feijoeiro-comum e dois tratamentos controle, um com N-mineral sem inoculação e o outro sem inoculação e sem N-mineral, com quatro repetições.

Inoculantes contendo as cepas das estirpes utilizadas foram preparados em turfa esterilizada em autoclave na proporção de 1:2 (v:v) de turfa e meio de cultura 79, a 28 °C e agitação constante (110 rpm) por 48 h (SOARES *et al.*, 2006). A inoculação das sementes foi realizada com o inoculante contendo  $10^9$  células  $g^{-1}$ , na dose de 100 g  $kg^{-1}$  de sementes.

A semeadura foi realizada em vasos PL 24 com capacidade para 5 L, revestidos internamente com saco plástico BD transparente (40 cm x 60 cm x 6 mm) e preenchido com solo de textura argilosa na proporção 2:1 (2 partes de areia para 1 de solo), adubado com cloreto de potássio (58% de  $K_2O$  + 0,5% de B) e superfosfato simples (18% de  $P_2O_5$ ), conforme a recomendação para adubação em vasos, adotando-se a maior dose (FAQUIM; VALE; FURTINI NETO, 2012). O solo foi preparado e analisado quanto as suas características físicas, químicas e biológica, na camada de 0-20 cm (Tabela 3).

Tabela 3- Caracterização química, física e biológica do solo.

pH	K	P	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T
----- mg/dm <sup>3</sup> -----			----- cmol <sub>c</sub> / dm <sup>3</sup> -----							
5,6	63,3	0,5	8	2,7	0,6	0,0	2,2	3,5	3,6	5,7
V	m	MO	P-rem	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S	
----- % -----		dag/kg	mg/L	-----cmol <sub>c</sub> / dm <sup>3</sup> -----						
61,2	2,8	1,4	6,3	1,3	27,4	18,9	1,5	0,1	14,2	
Argila	Silte	Areia	NMP							
-----Dag/ kg-----			----células g solo----							
59	13	28	3 x 10 <sup>3</sup>							

P- Na - K- Fe - Zn- Mn- Cu- Extrador Mehlich 1

pH em água, KCl e  $CaCl_2$  - Relação 1:2,5; Ca - Mg- Al- Extrator: KCl - 1 mol/L; H + Al- Extrator: SMP; Matéria Orgânica (MO) - Oxidação:  $Na_2Cr_2O_7$  4N+  $H_2SO_4$ 10N; B- Extrator água quente.

S - Extrator - Fosfato monocálcio em ácido acético

As parcelas do tratamento controle com N-mineral receberam a adubação nitrogenada tendo como fonte a ureia (44% de N), parcelada em  $\frac{1}{3}$  na semeadura e  $\frac{2}{3}$  em cobertura, na dose de 100 kg  $ha^{-1}$ . Antes da semeadura, as sementes foram desinfestadas. Na ocasião da semeadura, realizado no início da safra 2022/23, foram adotadas seis sementes por vaso, sem tratamento

químico destas, mantendo-se duas plantas após o desbaste aos 12 dias após a semeadura. A irrigação foi realizada diariamente, de forma manual, mantendo-se o solo na capacidade de campo.

No florescimento pleno das plantas (estádio R6) realizou-se leituras do índice SPAD (Soil Plant Analysis and Development), no terço média das plantas, com a amostragem de três folhas por planta. Posteriormente, as plantas foram cortadas rentes ao solo, e avaliados os seguintes caracteres morfoagronômicos: massa da matéria seca da parte aérea (MSPA), radicular (MSR) e de nódulos (MSN), obtidas em gramas, relação de nódulos viáveis (NVV) e teor de nitrogênio nas folhas (N). Para a estimativa de nódulos viáveis, foram selecionados, aleatoriamente, 20 nódulos parcela<sup>-1</sup>, que foram conferidos quanto a coloração interna, indicando ou não, a viabilidade. As matérias secas foram obtidas em estufa a 65° até atingir massa constante. As folhas dessecadas foram moídas para determinação do N total pelo método de Kjeldahl (JONES JR, 1987; MORRIES, 1983).

Atendendo os pressupostos da ANOVA, os dados foram submetidos à análise de variância, e as médias foram agrupadas pelo teste de Scott-Knott (1974), (p<0,05), integralizado no ambiente R Core Team (2017), conforme o modelo estatístico abaixo:

$$y_{ijk} = \mu + p_i + t_j + b_k + pt_{ij} + e_{ijk} \quad (1)$$

Em que:

$Y_{ijk}$  : Valor observado referente à parcela que recebeu a cultivar  $i$ , a fonte de nitrogênio  $j$ , no bloco  $k$ .

$\mu$  : Constante associada a todas as observações.

$p_i$  : Efeito fixo da cultivar  $i$ .

$t_j$  : Efeito fixo das fontes de N  $j$ .

$b_k$  : Efeito do bloco  $k$

$pt_{ij}$  : Efeito da interação entre a cultivar  $i$  e a fonte de nitrogênio  $j$ .

$e_{ijk}$  : Erro experimental aleatório associado à observação  $y_{ijk}$ .

A precisão experimental para cada variável foi avaliada pela estimativa da acurácia, descrita na expressão abaixo (RESENDE; DUARTE, 2007):

$$r\hat{g}g = \sqrt{1 - \frac{1}{F_c}} \quad (2)$$

Em que:

$F_c$ : F calculado na análise de variância.

E o coeficiente de variação foi obtido por meio do seguinte estimador:

$$CV = \left( \frac{\sqrt{QME}}{\bar{X}} \right) * 100 \quad (3)$$

Em que:

*QME*: Quadrado médio do erro.

$\bar{X}$ : Média amostral.

Adotando o método semelhante ao de Carvalho *et al.*, (2022), foi aplicado um dialelo parcial entre as cultivares de feijoeiro-comum e as estirpes de *Rhizobium*, determinando-se a capacidade geral e específica de combinação entre ambas. Na interação cultivar x estirpe, a capacidade geral refere-se a resposta média da combinação entre uma determinada cultivar com as estirpes e também no sentido inverso, em outro plano, a capacidade específica corresponde na resposta de uma determinada cultivar ou estirpe em combinação à outra.

As melhores cultivares e estirpes foram selecionadas considerando suas médias e a capacidade geral de combinação para o índice de variáveis padronizadas (índice Z). Para este índice, as observações de MSPA, MSR, NVV e N foram padronizados para torná-las diretamente comparável, segundo modelo proposto por Mendes, Ramalho e Abreu (2009):

$$Z_{ijkl} = \frac{(\bar{y}_{ijkl} - \bar{y}_{..kl})}{S_{..jk}} \quad (4)$$

Em que:

$Z_{ijkl}$ : Valor fenotípico padronizado da parcela que recebeu a cultivar *i*, a fonte de nitrogênio *j* no bloco *k* para a característica *l*;

$\bar{y}_{ijkl}$ : Valor observado na parcela que recebeu a cultivar *i*, fonte de nitrogênio *j* no bloco *k* para a característica *l*;

$\bar{y}_{..kl}$ : Média fenotípica do bloco *k* para a característica *l*;

$S_{..jk}$ : Desvio padrão fenotípico associado ao bloco *k* para a característica *l*.

Após a padronização, a soma Z foi obtida para cada parcela, atribuindo a adição da constante sete, calculada pela seguinte expressão:

$$Z_{ijkl} = \sum_{k=1}^n Z_{ijkl} = Z_{ijk1} + Z_{ijk2} + \dots + Z_{ijkn} \quad (5)$$

O modelo matemático proposto para a análise de interações entre cultivares e estirpe por meio de um arranjo dialélico parcial foi (MELO; SANTOS, 1999):

$$y_{ij} = \mu + g_i + g_j + s_{ij} + \bar{e}_{ij} \quad (6)$$

Em que:

$y_{ij}$  : Valor médio da combinação dialélica entre a cultivar  $i$  e a estirpe  $j$ .

$\mu$  : Constante, que neste caso representa a média geral dos tratamentos dialélicos.

$g_i$  : Efeito da habilidade geral de combinação da cultivar  $i$ .

$g_j$  : Efeito da habilidade geral de combinação da estirpe  $j$ .

$s_{ij}$  : Efeito da habilidade específica de combinação entre a cultivar  $i$  e a estirpe  $j$ .

$\bar{e}_{ij}$  : Média do erro experimental.

## 2.5 Experimento a campo

Dois experimentos foram conduzidos com as cultivares e estirpe, previamente selecionadas no experimento em casa de vegetação, na safra da seca/2023. Os experimentos foram implantados em duas áreas contrastantes, sendo uma com histórico de cultivo de feijão, milho e soja, em Lavras, e uma segunda de abertura, sem histórico de cultivo da cultura, sob palhada de milheto cultivar ADR-500, no município de Carrancas. Ambas com baixo teor de orgânica (Tabela 4) e sem irrigação.

Em Carrancas, foi incorporado 12 t ha<sup>-1</sup> de calcário até a camada de 40 cm e 3 t ha<sup>-1</sup> de gesso. As áreas receberam como fontes de fósforo e potássio, o superfosfato simples (18% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), na dose de 120 kg de P ha<sup>-1</sup> e cloreto de potássio (58% de K<sub>2</sub>O), na dose de 350 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, respectivamente. Para o tratamento com N-mineral, a ureia foi a fonte de N (44% de N), na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup>, aplicada na semeadura, à lanço. Realizou-se o manejo agrônômico, conforme a necessidade da cultura, seguindo-se as recomendações técnicas para o feijoeiro (ARF *et al.*, 2015).

Tabela 4- Caracterização química e biológica do solo na área de Carrancas (CC) e Lavras (LV)

	pH	K	P	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T
		----- mg/dm <sup>3</sup> -----			----- cmol <sub>c</sub> / dm <sup>3</sup> -----						
CC	5,8	87,25	9,40	13,0	4,43	2,14	0,10	1,20	6,79	6,89	7,99
LV	5,4	90,70	16,30	7,0	4,93	0,81	0,10	3,40	5,97	6,07	9,37
	V	m	MO	P-rem	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S	
	----- % -----	----- dag/Kg -----	mg/L	-----cmol <sub>c</sub> / dm <sup>3</sup> -----							
CC	85,03	1,45	2,67	35,9	0,60	47,40	9,40	0,66	0,15	15,40	
LV	63,7	1,65	3,60	28,90	3,70	24,40	13,70	1,05	0,20	18,40	
NMP (células g solo <sup>-1</sup> )											
CC	7,73 x 10 <sup>3</sup>										
LV	5,52 x 10 <sup>4</sup>										

P- Na - K- Fe - Zn- Mn- Cu- Extrator Mehlich 1  
 pH em água, KCl e CaCl<sub>2</sub> - Relação 1:2,5; Ca - Mg- Al- Extrator: KCl - 1 mol/L; H + Al- Extrator:  
 SMP; Matéria Orgânica (MO) - Oxidação: Na<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 4N+ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>10N; B- Extrator água quente.  
 S - Extrator - Fosfato monocálcio em ácido acético

O delineamento experimental foi de blocos casualizados completos (DBCC), no esquema fatorial (7 x 4), com os tratamentos constituídos de sete cultivares, duas estirpes (estirpe comercial + estirpe selecionada) e dois tratamentos controle, com N-ureia e sem inoculação e sem N e sem inoculação, com quatro repetições. O preparo do inoculante e a inoculação das sementes foram realizados de maneira semelhante à descrita no experimento em casa de vegetação. A semeadura foi conduzida de forma manual, sem nenhum tratamento químico das sementes, na densidade de 12 sementes m<sup>-1</sup>. As parcelas foram constituídas por quatro linhas de 5 m de comprimento, espaçadas em 0,60 m, e área útil de 6 m<sup>2</sup> (colheita das duas linhas centrais).

No florescimento pleno avaliou-se a MSN, MSR, MSPA, obtidas em estufa a 65 °C, por 72 h, expresso em gramas e o teor de nitrogênio nas folhas, utilizando todas as folhas da planta. Na colheita, procedeu-se com avaliações do número de vagem por plantas (NV), peso de cem grãos (PCG), em gramas e produtividade de grãos (PROD), corrigida para 13% de umidade, apresentada em kg ha<sup>-1</sup>.

Os dados foram submetidos à análise de variância individual e posteriormente, conjunta, e as médias quando significativas, agrupadas pelo teste de Scott-Knott (1974), (p<0,05), integralizadas no ambiente R Core Team (2017). A precisão experimental foi obtida pelo estimador do coeficiente de variação (equação 3). As análises individuais por experimento, para todas as características, foram realizadas usando o modelo estatístico 7:

$$y_{ijk} = \mu + p_i + t_j + b_k + pt_{ij} + e_{ijk} \quad (7)$$

Em que:

$y_{ijk}$ : Valor observado referente à parcela que recebeu a cultivar  $i$ , a fonte de nitrogênio  $j$ , no bloco  $k$ .

$\mu$ : Constante associada a todas as observações.

$p_i$ : Efeito fixo da cultivar  $i$ .

$t_j$ : Efeito fixo da fonte de nitrogênio  $j$ .

$b_k$ : Efeito do bloco  $k$ .

$pt_{ij}$ : Efeito da interação entre cultivar  $i$  e fonte de nitrogênio  $j$ .

$e_{ijk}$ : Erro experimental aleatório associado à observação  $y_{ijk}$

Para a análise conjunta, adotou-se o modelo estatístico:

$$Y_{ijkl} = \mu + p_i + t_j + a_k + b_{l(k)} + (pt)_{ij} + (pa)_{ik} + (ta)_{jk} + (pta)_{ijk} + e_{ijk(l)} \quad (8)$$

Em que:

$Y_{ijkl}$ : Valor observado referente à parcela que recebeu a cultivar  $i$ , a fonte de nitrogênio  $j$ , no bloco  $k$ , no local  $l$

$\mu$ : Constante associada a todas as observações;

$p_i$ : Efeito fixo da cultivar  $i$ ;

$t_j$ : Efeito fixo da fonte de nitrogênio  $j$ ;

$a_l$ : Efeito do ambiente  $l$ ;

$b_{k(l)}$ : Efeito do bloco  $k$  dentro ambiente  $l$ ;

$(ta)_{ik}$ : Efeito da interação da cultivar  $i$  com as fontes de N  $j$ ;

$(pa)_{ik}$ : Efeito da interação da cultivar  $i$  no ambiente  $l$ ;

$(pta)_{ij(k)}$ : Efeito da interação da cultivar  $i$  com as fontes de N  $j$  e o ambiente  $k$ ;

$e_{ijk(l)}$ : Erro experimental aleatório associado à observação  $Y_{ijkl}$ .

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Experimento em casa de Vegetação

A precisão experimental atrela-se ao potencial de confiabilidade, repetibilidade e acertabilidade de um estudo, intrinsecamente associado à sua qualidade. As estimativas da acurácia e do coeficiente de variação são comumente atinadas como métricas deste fundamento. Neste estudo, as variáveis MSR, MSN e NVV apresentaram CVs que extrapolam o intervalo de precisão aferida por essa escala (Tabela 5). Contudo, no contexto de variáveis biológicas, sobretudo microbiológicas, a obtenção de CVs superiores não é necessariamente, um indicativo da ineficiência experimental, uma vez que são caracteres dinâmicos e, frequentemente, variáveis com o ambiente (SOUZA *et al.*, 2008).

Tabela 5 - Resumo da análise de variância relacionada à avaliação de cultivares de feijoeiro-comum e fontes de nitrogênio.

FV	GL	SPAD	MSPA	MSR	MSN	NVV	N
Pr > (F <sub>c</sub> )							
Cultivar (C)	14	0,0000*	0,0000*	0,0002*	0,5513 <sup>ns</sup>	0,0017*	0,0000*
Estirpe (E)	2	0,8216 <sup>ns</sup>	0,1276*	0,0142*	0,0919 <sup>ns</sup>	0,0000*	0,0005*
Testemunhas	1	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*
E vs CN	1	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*
E vs SN	1	0,9802 <sup>ns</sup>	0,7574 <sup>ns</sup>	0,1557 <sup>ns</sup>	0,0002*	0,0281*	0,4099 <sup>ns</sup>
C x FN	56	0,0000*	0,0195*	0,0000*	0,1460 <sup>ns</sup>	0,1944 <sup>ns</sup>	0,0000*
C x E	42	0,0002*	0,0312*	0,0023*	0,0681 <sup>ns</sup>	0,1135 <sup>ns</sup>	0,0000*
CV (%)		8,06	20,72	69,39	56,1	51,21	18,59
<i>rgg</i> (C)		0,97	0,86	0,82	0	0,78	0,92

CN: Com nitrogênio; SN: Sem nitrogênio; FN: Fontes de nitrogênio; \*Significativo pelo teste F ( $p < 0,05$ ); <sup>ns</sup> Não significativo; SPAD: Índice SPAD; MSPA: Matéria seca da parte aérea; MSR: Matéria seca radicular; NVV: Relação de nódulos viáveis; N: Teor de nitrogênio.

Fonte: Da autora (2024).

São escassos trabalhos que correlacionem níveis aceitáveis de dispersão de variáveis biológicas à qualidade experimental, e os valores de CVs encontrados para essas três variáveis são congruentes aos apresentados na literatura ao que se refere a FBN (CHEKANAI, CHIKOWO; VANLAUWE, 2018; PACHECO, 2020). Contudo, para alguns autores, o valor de dispersão máximo para características biológicas e medida pelo CV deve ser ponderada a 35% (SOUZA *et al.*, 2008). Vale ressaltar que não existem estudos recentes acerca da avaliação quantitativa da biologia do solo que contra-argumentam ou reproduzam as conclusões desses autores, perfazendo-se restrito, quando o intuito é definir parâmetros de qualidade em pesquisas que atuam sobre a biodiversidade do solo.

No caso específico da FBN, CVs elevados podem estar associados ao baixo potencial de competitividade do microssimbionte, possibilitando que sítios de ligação sejam ocupados por bactérias menos eficientes, principalmente em solos que apresentam altas populações de rizóbios nativos competitivos, mas ineficazes, refletindo em todos os aspectos que envolvem a nodulação (DICENZO *et al.*, 2018). Em relação a acurácia, a precisão do experimento pressupõe entre o intervalo de alta a muito alta, com exceção para MSN, que assume  $rgg = 0$ , considerando que o  $F_c < 1$  (RESENDE; DUARTE, 2007). Essa métrica associa-se à maior variabilidade genética e a menores variâncias residuais, o que justifica a sua baixa magnitude para a MSN e um decréscimo em NVV em comparação as demais variáveis (CARGNELUTTI-FILHO; STORCK, 2009).

Diferenças significativas foram observadas entre as estirpes de *Rhizobium* quanto a à eficiência para MSPA, MSR, N e NVV ( $p < 0,05$ ) em cultivares de feijoeiro-comum, embora a interação com as cultivares tenha sido significativa (Tabela 5). A eficiência de uma estirpe está associada ao seu potencial de fixação FBN e a sua capacidade competitiva, uma vez que, os rizóbios são membros comuns nas populações microbianas do solo, podendo haver a supressão da estirpe inoculada por aqueles já presentes (KAWAKA; MUOMA, 2020). Neste estudo foi possível aferir diferença significativa não apenas entre as estirpes inoculadas, mas entre estas e a população nativa do solo, evidenciada pela diferença no contraste (E vs SN). A competitividade entre estirpes é um caráter genético e de ampla variabilidade (AGUILAR, COLLAVINO; MANCINI, 2021; MENDOZA-SUAREZ *et al.*, 2021). Neste sentido, precisa-se considerar não apenas o número de rizóbios já residentes, mas também a sua capacidade competitiva (MWENDA *et al.*, 2018).

A natureza pela qual uma resposta à inoculação pode ser inibida relaciona-se com uma série de fatores, muitos ainda de rasa compressão, no entanto, historicamente, estudos foram desenvolvidos a fim entender a superação dessa inibição, como os de Weaver e Frederick (1974), em que relataram ser necessário uma população superior a  $10^3$  rizóbios semente<sup>-1</sup> de soja em relação à população do solo, para obter uma resposta à inoculação. Em outros estudos, Singleton e Tavare (1986); Vargas *et al.*, (2000) evidenciaram que solos com populações inferiores a  $10^2$  rizóbios g solo<sup>-1</sup> ou mesmo 50 rizóbios g solo<sup>-1</sup> (THIES, SINGLETON e BOHLOOL, 1991) eram suficientes para constituir uma barreira à resposta à inoculação. A partir do NMP, a análise microbiológica do solo utilizado neste trabalho revelou uma população de  $3 \times 10^3$  células g solo<sup>-1</sup>, enfatizando o potencial competitivo das estirpes inoculadas, em conformidade com os resultados apresentados por Hungria *et al.* (2000), no qual obtiveram aumento no número e MSN com a inoculação de duas estirpes de *R. tropici* (CIAT 899 e PRF 81), mesmo em solo com alta população nativa de rizóbios de feijoeiro ( $10^4$  a  $10^5$  rizóbios g solo<sup>-1</sup>).

Em relação ao contraste E vs CN, as respostas foram significativas para todas as variáveis. Para MSN e NVV, em função da adubação mineral, houve a inibição da simbiose e consequentemente, da nodulação, uma vez que o estímulo para a infecção das bactérias fixadoras ocorre sob baixa disponibilidade de N no solo. Quando há disponibilidade de não ocorre o estresse necessário à produção do isoflavona, que atua como sinalizadora à simbiose (TAIZ *et al.*, 2017) (Tabela 6). Para Raven *et al.*(2001), em condições de alta disponibilidade de N-mineral, a inibição da FBN ocorre pelo alto gasto energético desse processo, o tornando

oneroso para planta, fazendo com que esta dê preferência por vias de menor custo energético. Para a redução de uma molécula de N<sub>2</sub> são necessárias 16 moléculas de ATP, enquanto a assimilação de nitrato requer 12 moléculas de ATP (CÂMARA, 2014).

Tabela 6- Médias de massa seca e viabilidade de nódulos em raízes de *Phaseolus vulgaris* inoculado com diferentes estirpes

Fonte de N	MSN (g)	NVV <sup>1</sup>
CIAT 899	1,15 a	0,69 a
UFLA 02-100	1,20 a	0,51 b
UFLA 02-127	1,02 a	0,47 b
S N-Mineral	0,82 b	0,47 b
C N-Mineral	0,00 c	0,00 c

<sup>1</sup> Amostragem de 20 nódulos.

Médias seguidas pela mesma letra na coluna pertencem ao mesmo grupo pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ).

MSN: Matéria seca de nódulos; NVV: Nódulos viáveis.

Fonte: Da autora (2024).

A eficiência das estirpes denota dependência do fator cultivar, a partir da interação significativa C x E, para as características de SPAD, MSPA, MSR e N, evidenciando uma especificidade estirpe-cultivar (Tabela 5). Embora o acúmulo de N tenha variado em função da cultivar e da estirpe, não ocorreu diferença significativa para MSN e NVV. Para a característica de NVV, a melhor resposta foi obtida com a estirpe comercial CIAT 899 (Tabela 6) Por outro lado, entre as estirpes, não houve diferença na MSN. Sobre a viabilidade dos nódulos, o tamanho deste é um fator que deve ser considerado, pois muitas vezes, nódulos pequenos são inviáveis (MATOSO; KUSDRA, 2014). Neste trabalho, contudo, deve-se enfatizar que a amostragem de nódulos ocorreu de forma aleatorizada, desconsiderando o tamanho deste.

A superioridade da estirpe CIAT 899 é notória, em que diversos estudos evidenciam uma maior razão de nódulos viáveis e potencial competitivo (MILCHESKI *et al.*, 2022), caracterizada pela sua versatilidade e tolerância a estresses abióticos e alta capacidade de FBN, especialmente em simbiose com feijoeiro-comum (TULLIO *et al.*, 2018). As respostas encontradas para as estirpes UFLA 02-100 e UFLA 02-127 são relevantes, embora não tenha se diferenciado na resposta obtida para NVV em comparação à população nativa de rizóbios. No entanto, não necessariamente reflete em uma menor eficiência, uma vez que, ainda que a MSN seja um dos indicativos de boa nodulação, o número e o tamanho dos nódulos também sugerem a mesma finalidade (CÂMARA, 2014).

Como embasamento a este argumento, estudos anteriores já haviam demonstrado eficiência das estirpes UFLA 02-100 e UFLA 02-127, caracterizando a capacidade competitiva

e desempenho superior em relação às cepas nativas (FIGUEIREDO *et al.*; 2016; FONSECA *et al.*, 2013; NOGUEIRA *et al.* 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2017; SOARES *et al.*, 2006), sugerindo que podem ser tão eficientes quanto à CIAT 899 no processo de FBN. Andrade, Murphy e Giller (2000) verificaram maior ocorrência de *R. leguminosarum* bv. *phaseoli* em relação ao *R. tropici*, em solos que não receberam calagem e, portanto, com valores menores de pH. Este fato também foi observado por Soares *et al.* (2006) em pH igual a 4,9, tendendo a hipótese de que o pH pode ter favorecido a nodulação por *R. tropici* (CIAT 899). Por outro lado, Hungria *et al.* (2000), que relataram o domínio de isolados com características de *R. tropici* nas regiões tropicais e solos ácidos devido sua estabilidade genética e a tolerância à acidez e altas temperaturas.

A indisponibilidade de micronutrientes como o ferro (Fe) pode limitar os processos relacionados à nodulação. Pela análise química do solo cultivado neste experimento, observa-se que a disponibilidade de Fe está abaixo do nível crítico (RIBEIRO, GUIMARÃES; ALVAREZ, 1999), podendo ser este um fator associado à baixa viabilidade dos nódulos nas estirpes UFLA, considerando a resposta diferenciada entre genótipos de *Rhizobium* à fatores abióticos. Todavia, sugere-se que sob condições limitantes deste nutriente, as plantas mobilizam Fe, preferencialmente das raízes, por fluxo ascendente no xilema, logo, os nódulos simbióticos estão protegidos contra uma diminuição excessiva da sua concentração (SLATNI *et al.*, 2008).

No desdobramento da interação C x FN das variáveis SPAD, MSPA, MSR e N, considerando apenas a inoculação e a população nativa de rizóbios, as cultivares BRS FC 406, Ouro Vermelho e BRS Madrepérola foram algumas das quais apresentaram os maiores teores de N nas folhas e índice SPAD (Figura 4). Essas duas variáveis apresentam uma íntima correspondência, e diversos estudos em folhas de diferentes espécies apresentaram correlação positiva com a suficiência de N (BENATI, NAVA e MAYER, 2021; VIDIGAL, 2020; VIDIGAL *et al.*, 2021) podendo ser considerado um índice indireto para avaliar o estado de nitrogênio das plantas, justificando o ranqueamento das três cultivares neste quesito.

Em termos das fontes de N, considerando apenas a média fenotípica, a adubação mineral proporcionou maiores índices de clorofila e, conseqüentemente, de N (Figura 4). A estirpe de melhor média foi a CIAT 899, com 59,52% de teor de N observado na adubação mineral, considerando a média fenotípica destas. Este fato confirma o que já é elucidado em muitos trabalhos, que a inoculação com *Rhizobium* pode reduzir parcialmente a necessidade da

adubação de N-mineral na cultura do feijoeiro-comum (CHEKANAI, CHIKOWO e VANLAUWE, 2018; WOLSCHICK *et al.*, 2016).

Figura 4 - Matéria seca da parte aérea, matéria seca radicular, teor de nitrogênio e índice SPAD em cultivares de feijoeiro-comum inoculado com diferentes estirpes de *Rhizobium*.

	MSPA					MSR					Z score
	CIAT-899	UFLA02-100	UFLA02-127	Sem N	Com N	CIAT-899	UFLA02-100	UFLA02-127	Sem N	Com N	
FC409	11,25 aC	10,67 aB	12,97 aA	10,97 aA	7,90 aA	3,63 bA	4,73 bB	4,23 bA	3,55 bA	13,90 aA	
FC104	12,64 aC	12,70 aA	10,90 aA	12,52 aA	4,83 bA	4,52 bA	10,90 aA	2,97 bA	3,32 bA	3,47 bC	
FC414	13,30 aC	14,02 aA	12,95 aA	10,47 bA	9,80 bA	5,95 bA	6,43 bB	6,95 bA	5,45 bA	17,58 aA	
FC406	11,75 aC	14,30 aA	12,50 aA	12,30 aA	9,22 aA	3,10 aA	6,55 aB	4,20 aA	3,13 aA	9,30 aB	
Estilo	12,03 aC	15,20 aA	9,85 bA	10,92 aA	8,00 bA	5,15 aA	5,57 aB	4,72 aA	5,32 aA	3,45 aC	
FC402	12,70 aC	15,20 aA	13,27 aA	13,22 aA	8,25 bA	5,95 cA	10,73 bA	3,50 cA	2,70 cA	20,40 aA	
FP403	11,93 aC	9,55 bB	12,45 aA	14,00 aA	6,97 bA	4,30 aA	4,65 aB	3,27 aA	2,98 aA	8,80 aB	
Esteio	9,40 bC	10,77 aB	12,50 aA	12,32 aA	8,00 bA	3,53 bA	2,55 bB	4,88 bA	7,10 aA	10,28 aB	
Uai	12,60 aC	15,22 aA	10,50 bA	12,67 aA	8,62 bA	2,93 bA	3,40 bB	4,90 bA	4,32 bA	14,67 aA	
Pérola	14,50 aB	14,27 aA	13,15 aA	14,12 aA	8,30 bA	3,22 aA	4,97 aB	3,58 aA	2,55 aA	1,98 aC	
Madrepérola	9,95 aC	13,80 aA	12,47 aA	11,55 aA	10,85 aA	3,13 bA	5,85 bB	3,70 bA	4,85 bA	17,25 aA	
Zape	14,55 aB	13,75 aA	11,10 bA	14,82 aA	8,63 bA	4,95 aA	5,48 aB	3,50 aA	3,05 aA	1,17 aC	
Ouro vermelho	19,10 aA	15,92 bA	14,37 bA	12,62 cA	8,47 dA	3,68 bA	5,18 bB	4,85 bA	2,15 bA	19,70 aA	
Marte	15,90 aB	13,35 aA	14,05 aA	14,92 aA	8,25 bA	4,08 bA	10,47 aA	5,72 bA	3,92 bA	1,42 bC	
Amuleto	10,40 aC	11,85 aB	12,30 aA	12,90 aA	7,07 bA	4,80 aA	4,20 aB	4,33 aA	8,57 aA	1,43 aC	
	N					SPAD					
FC409	1,80 bB	2,03 bC	2,20 bB	1,70 bB	4,43 aA	26,24 bD	25,53 bC	27,53 bC	28,83 bB	33,30 aB	
FC104	2,76 bA	2,55 bC	3,10 bA	2,35 bB	3,85 aB	26,83 cD	35,14 bA	27,35 cC	27,75 cB	39,41 aA	
FC414	2,43 bB	2,35 bC	2,30 bA	3,67 aA	3,87 aB	36,85 bA	34,45 bA	37,28 bA	34,73 bA	40,67 aA	
FC406	3,45 aA	3,77 aA	2,35 bA	3,05 bA	3,70 aB	29,81 bC	31,03 bB	32,55 bB	31,40 bB	35,63 aB	
Estilo	2,15 bB	1,77 bC	1,45 bB	2,25 bB	3,25 aB	29,71 bC	30,13 bB	28,41 bC	31,82 bB	36,00 aB	
FC402	2,43 bB	2,75 bB	2,00 bB	2,35 bB	4,22 aA	33,63 aB	36,22 aA	30,93 bB	34,71 aA	35,91 aB	
FP403	2,55 cB	3,22 bB	1,82 cB	2,40 cB	4,60 aA	31,46 bC	31,96 bB	32,14 bB	31,28 bB	38,52 aA	
Esteio	2,63 bB	2,42 bC	1,97 bB	2,40 bB	4,07 aB	30,52 bC	30,04 bB	31,39 bB	28,96 bB	40,17 aA	
Uai	2,53 bB	2,02 bC	1,65 bB	1,95 bB	3,90 aB	29,08 bC	28,56 bB	29,82 bB	30,73 bB	38,48 aA	
Pérola	2,10 bB	2,35 bC	2,70 bA	2,17 bB	4,10 aB	40,19 aA	37,69 aA	37,71 aA	36,34 aA	37,43 aA	
Madrepérola	2,80 aA	2,30 bC	2,60 aA	1,90 bB	3,32 aB	30,10 bC	31,28 bB	30,36 bB	28,88 bB	35,73 aB	
Zape	2,10 bB	2,20 bC	2,12 bB	2,22 bB	4,50 aA	34,73 aB	34,98 aA	32,50 aB	34,59 aA	34,82 aB	
Ouro vermelho	3,00 bA	1,73 cC	1,90 cB	2,75 bA	4,50 aA	31,67 bC	32,54 bB	32,14 bB	32,75 bA	39,81 aA	
Marte	3,20 bA	2,83 bB	2,62 bA	2,37 bB	4,83 aA	33,13 aB	30,06 aB	34,13 aA	34,33 aA	34,51 aB	
Amuleto	2,30 cB	2,10 cC	1,97 cB	3,27 bA	5,27 aA	33,53 aB	29,29 bB	30,20 bB	29,71 bB	36,10 aB	

Médias seguidas da mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna linha, pertencem ao mesmo grupo pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ).

MSPA: Matéria seca da parte aérea (g); MSR: Matéria seca radicular (g); N: Teor de Nitrogênio (%); SPAD: Índice SPAD.

Fonte: Da autora (2024).

Avaliando o teste de agrupamento de médias, observa-se variação entre as fontes de N em função da cultivar. Quando se compara as estirpes da UFLA com a população de rizóbios já residente no solo, majoritariamente, estas se comportam de forma muito similar para índice SPAD e N, sendo esta uma relação coesa (Figura 4).

O nitrogênio está relacionado com um maior vigor vegetativo das plantas, apresentando uma ligação direta com a produtividade. Embora a adubação nitrogenada tenha promovido em média geral maiores teores de N, este fato não refletiu em maiores MSPA. Deve-se ressaltar que todas as parcelas que receberam a adubação com N-mineral apresentaram desenvolvimento inicial retardado em relação a outras fontes de N, possivelmente relacionado com o efeito de

salinidade causado pela ureia no solo. Contudo, deve-se comentar que foi adotada a dose recomendada para a cultura e o parcelamento desta. Kikuti *et al.* (2005) observaram redução na emergência de feijão em quatro safras consecutiva e atribuíram tal fato à redução do potencial hídrico e conseqüentemente, a inibição da absorção de água pelas sementes. Autores relatam o baixo rendimento de plantas quando níveis de nutrientes aplicados em campo foram aplicados em vaso.

Quando se considera a MSR, a adubação mineral está no melhor grupo de média, seguido pela resposta obtida com a inoculação com a UFLA 02-100. Embora o estabelecimento inicial das parcelas adubadas tenha sido inferior, as plantas tiveram alto investimento em raízes, o que justifica a maior absorção e acúmulo de nitrogênio por estas. Nogueira *et al.* (2017) avaliando a eficiência da inoculação em relação à adubação com 80 kg ha<sup>-1</sup> não obtiveram diferença significativa para MSR entre a UFLA 02-100, UFLA 02-127 e adubação com N-mineral, muito embora as maiores produtividades foram obtidas com a adubação.

### 3.1.1 Capacidade combinatória para FBN em feijoeiro-comum

Observa-se uma íntima relação estirpe-cultivar, assim como uma vasta diversidade à resposta para FBN, a depender das características genótípicas do macro e microsimbionte, e modulada por uma intensa troca de sinais moleculares, refletindo nas diferentes respostas em relação a faixa hospedeira, especificidade e eficiência simbiótica (HARTWIG, 1998). A variabilidade genética é uma das premissas para o melhoramento, e neste estudo, evidencia-se que ocorreram diferenças significativas entre as cultivares e estirpes para a CGC e CEC para a maioria das características avaliadas (Tabela 7).

Tabela 7 - Resumo da análise dialélica de estirpes e cultivares de feijoeiro-comum.

FV	GL	SPAD	MSPA	MSR	QM			
					MSN	NVV	N	IZ
CGC (T)	16	92,38*	23,82*	21,01*	0,29 <sup>ns</sup>	0,21*	1,67*	37,63*
CGC (C)	14	105,38*	25,42*	14,32*	0,26*	0,13*	1,61*	30,58*
CGC (E)	2	1,38 <sup>ns</sup>	12,56*	67,85*	0,53*	0,81*	2,06*	87,00*
CEC	28	14,08*	9,51*	10,48 <sup>ns</sup>	0,35 <sup>ns</sup>	0,07 <sup>ns</sup>	0,56*	9,91*
Resíduo	132	6,89	5,11	8,62	0,3	0,06	0,25	4,17

\*Significativo pelo teste F (p<0,05)

<sup>ns</sup> Não significativo

T: Total; C: Cultivar; E: Estirpe; CGC: Capacidade geral de combinação; CEC: Capacidade específica de combinação; SPAD: índice SPAD; MSPA: Matéria seca da parte aérea; MSR: Matéria seca radicular; MSN: Matéria seca de nódulos; NVV: Relação de nódulos viáveis; N: Teor de nitrogênio. Índice Z : (MSPA; MSR; MSN; NVV e N).

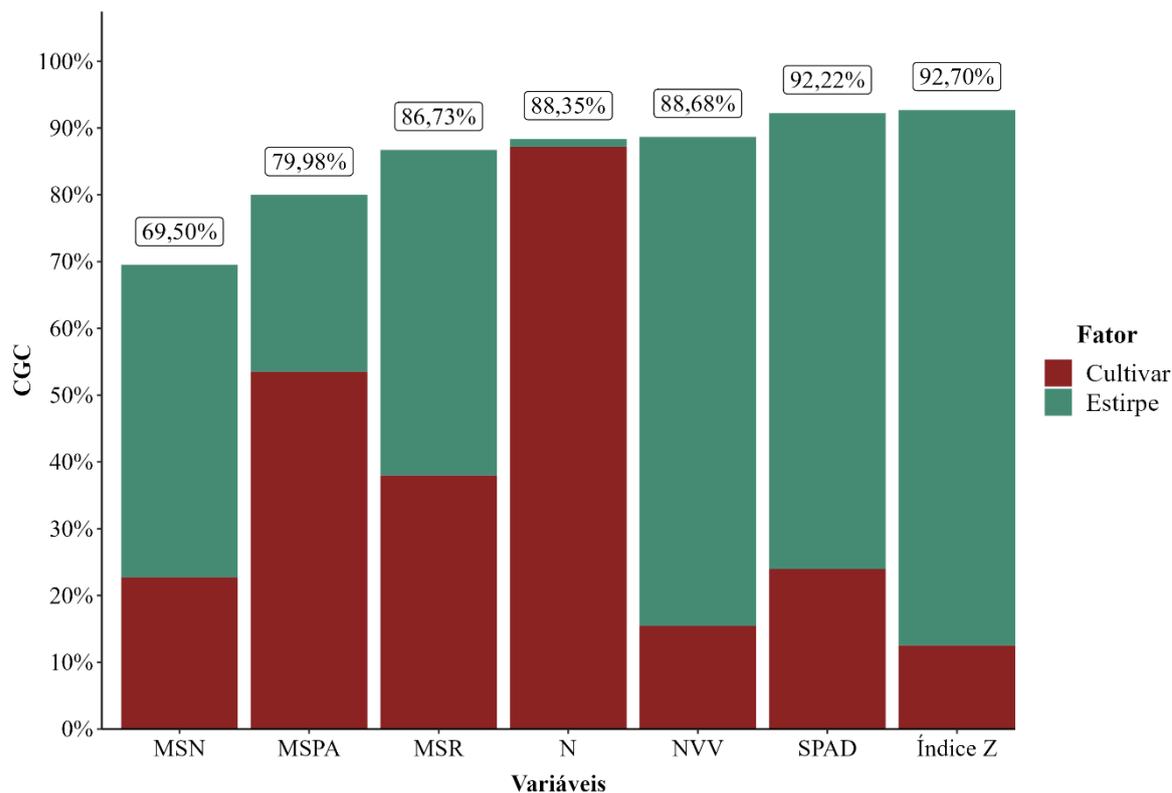
Fonte: Da autora (2024)

As características MSR, MSN e NVV não foram significativas para CEC. A CEC está relacionada aos efeitos gênicos não-aditivos, neste caso, a relação par a par de estirpe e cultivar, o que corrobora para a indicação da melhor combinação (FERREIRA *et al.*, 2002). Em termos de FBN, a CEC é uma característica de interesse ambíguo, pois por parte do rizóbio deseja-se uma ampla faixa de hospedeiro e da espécie vegetal, a menor promiscuidade possível. As significâncias observadas para a grande maioria das características indicam a existência de variabilidade, resultante da ação de efeitos gênicos aditivos e não-aditivos no controle das características avaliadas, exceto para MSR, MSN e NVV, em que predominaram apenas efeitos gênicos aditivos.

Os valores dos quadrados médios dos efeitos da capacidade geral de combinação foram estatisticamente superiores aos correspondentes da capacidade específica de combinação para as características SPAD, MSPA, MSR, NVV, N e IZ (Figura 5). Significância para CGC indica que efeitos gênicos aditivos estão envolvidos no controle genético da característica, sendo estes fixados ao longo de sucessivas gerações e possibilitando obter novas cultivares derivadas de populações segregantes a partir de cruzamentos com os genitores testados (FERREIRA *et al.*, 2019). A contribuição relativa das capacidades de combinação confirma o efeito aditivo sob as características relacionadas à FBN (Figura 5). Este resultado corrobora com Agoyi *et al.* (2016), Carvalho *et al.* (2022), Nicolas, Arrabal e Hungria (2002) e Yang *et al.* (2019), em que os autores concluíram que os efeitos aditivos foram predominantes nos traços relacionados à FBN.

A avaliação do número e MSN são alguns dos critérios que fazem parte do protocolo de avaliação da eficiência simbiótica entre rizóbios e leguminosas, e está atrelado ao potencial de FBN e produtividade (COSTA *et al.*, 2011). O tamanho dos nódulos está relacionado a sua densidade bacteriana, de forma que nódulos maiores permitem uma maior ocupação e em síntese, maior FBN. Estudando a cronologia de formação e desenvolvimento dos nódulos é evidente a relação direta que há entre a planta hospedeira e o rizóbio sob a expansão nodular (TAIZ *et al.*, 2017), o que justifica esta não ser uma característica específica de combinação, ou seja, predominada por efeitos aditivos. Estes microrganismos apresentam informação genética para estabelecer, em conjunto com a planta hospedeira, os nódulos fixadores de nitrogênio.

Figura 5 – Estimativa da contribuição relativa dos efeitos da Capacidade Geral de Combinação de cultivares de feijoeiro-comum e estirpes de *Rhizobium*.



MSN: Matéria seca de nódulos; MSPA: Matéria seca da parte aérea; MSR: Matéria seca radicular; N: Teor de nitrogênio; NVV: Nódulos viáveis; SPAD: índice SPAD; Índice Z: (MSPA, MSR, NVV e N).

Fonte: Da autora (2024)

Baseando-se na CGC, as cultivares BRS Estilo, BRS FC409, BRS Madrepérola e FC104 apresentam a maior frequência de estimativas negativas (Tabela 8). Estimativas correspondendo a altos valores de CGC, positivos ou negativos, indicam genótipos muito superiores ou inferiores aos demais (RAMALHO, SANTOS e ZIMMERMANN, 1999). A variabilidade existente entre os genótipos de feijoeiro-comum reflete na diferença na massa, número e eficiência dos nódulos, atividade da nitrogenase e N total acumulado pelas plantas. Efetivamente, a simbiose para FBN não é uma característica de avaliação durante o processo de seleção de cultivares de feijoeiro, de modo que novas cultivares têm sido desenvolvidas, sem que seu potencial simbiótico tenha sido analisado, tornando-se imprescindível uma avaliação mais precisa do potencial da FBN de diferentes cultivares de feijoeiro-comum.

Tabela 8 - Estimativas dos efeitos da Capacidade Geral de Combinação para seis caracteres avaliados em cultivares feijoeiro-comum e estirpes de *Rhizobium*.

	SPAD	MSPA	MSR	MSN	NVV	N
BRSMG Amuleto	-0,79	-1,29	-0,44	0,10	0,01	-0,26
BRS FC 402	1,80	0,92	1,84	0,03	0,01	0,01
BRS Estilo	-2,38	-0,96	0,26	-0,03	-0,03	-0,60
BRS FC406	-0,66	0,04	-0,27	-0,27	0,01	0,80
BRS FC414	4,40	0,62	1,56	-0,11	-0,05	-0,03
BRS FC104	-2,02	-0,73	1,25	-0,18	-0,08	0,41
BRS FC409	-5,36	-1,18	-0,69	-0,02	-0,11	-0,38
BRSMG Marte	0,64	1,62	1,87	-0,13	-0,02	0,50
Ouro Vermelho	0,32	3,66	-0,32	-0,05	-0,17	-0,18
BRSMG Zape	2,27	0,32	-0,24	0,14	0,06	-0,25
BRS MdPérola	-1,21	-0,73	-0,66	-0,02	-0,07	0,18
Pérola	6,73	1,17	-0,96	0,12	0,00	0,00
BRSMG Uai	-2,64	-0,03	-1,14	0,27	0,02	-0,32
BRS Esteio	-1,15	-1,92	-1,24	0,20	0,18	-0,04
BRS FP403	0,06	-1,50	-0,81	-0,05	0,24	0,15
CIAT 899	0,03	-0,01	-0,69	0,03	0,13	0,16
UFLA 02-100	0,13	0,46	1,22	0,08	-0,05	0,04
UFLA 02-127	-0,17	-0,45	-0,53	-0,11	-0,09	-0,20

SPAD: índice SPAD; MSPA: Matéria seca da parte aérea; MSR: Matéria seca radicular; MSN: Matéria seca de nódulos; NVV: Nódulos viáveis; N: Teor de nitrogênio.

Fonte: Da autora (2024)

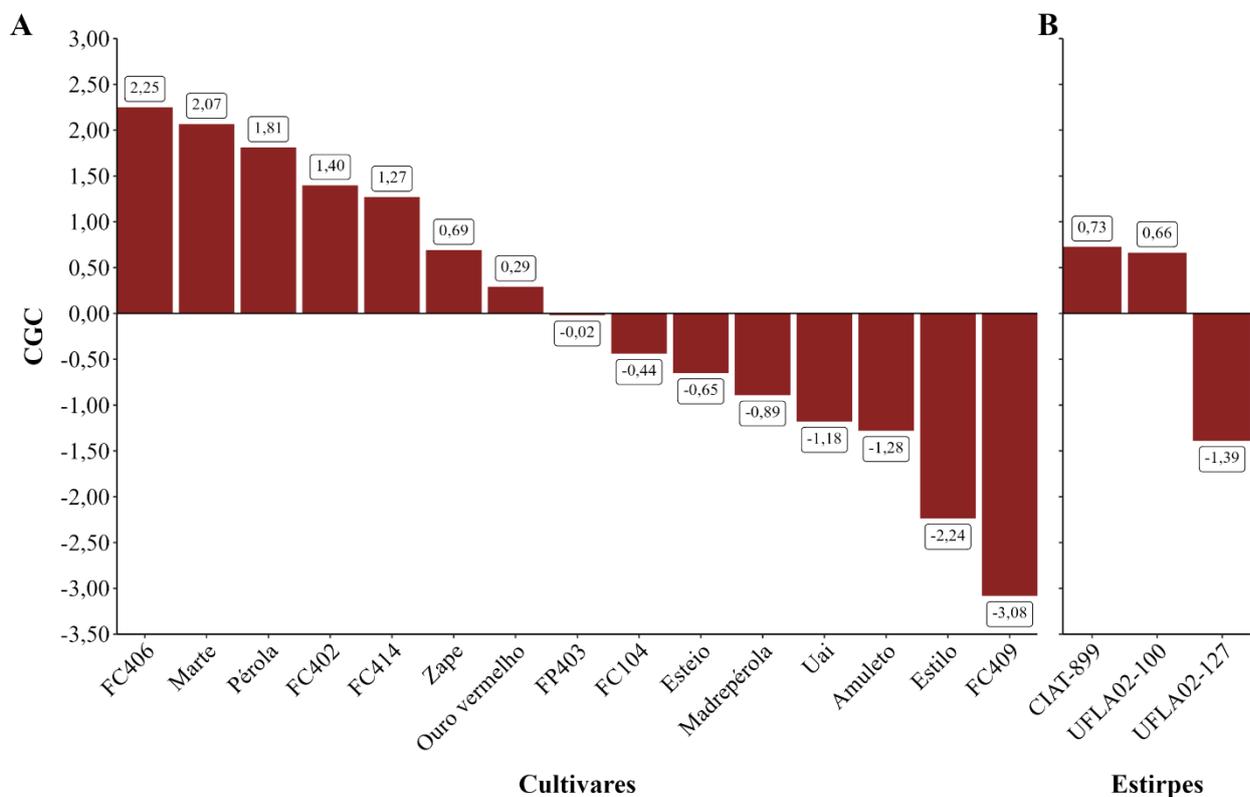
As cultivares BRS Estilo, BRS FC409, BRS Madrepérola e FC104 são genótipos de crescimento indeterminado, com ciclo médio de 85, 83, 86 e 63 dias, respectivamente. Estudos já evidenciaram a relação entre a duração do ciclo e a eficiência de FBN de cultivares de feijoeiro, no qual em condições de campo, observaram que genótipo de ciclo de 90 dias apresentaram uma contribuição média de 62% da FBN, enquanto que uma cultivar precoce de 60 dias apresentou 40% (RUSCHEL *et al.*, 1982). Em relação ao hábito de crescimento, experimentos de campo no Chile evidenciaram maior FBN em cultivares tipo III, que chegaram a alcançar 90 kg N ha<sup>-1</sup>, embora algumas cultivares tipo I e II também tenham apresentado bom desempenho, porém nenhuma ultrapassando 75 kg N ha<sup>-1</sup> (HARDARSON *et al.*, 1993).

Objetivando ferramentas para o melhoramento dessa característica, considerando que houve predominância de efeitos aditivos, uma estratégia que poderia ser adotada em programas de melhoramento visando a FBN seria a seleção recorrente. Esta estratégia de melhoramento foi proposta para plantas alógamas (HALLAUER; MIRANDA FILHO, 1988), porém nos últimos anos tem sido aplicada no melhoramento de plantas autógamas para aumentar a

frequência de alelos favoráveis em feijoeiro (SILVA *et al.*, 2010; MENEZES JUNIOR *et al.*, 2013; PIRES *et al.*, 2014; LEITE *et al.*, 2016; LOPES *et al.*, 2019).

Considerando a abordagem multivariada pelo índice Z (IZ), a cultivar Pérola destaca-se, considerando o seu ciclo e hábito de crescimento. Por outro lado, as duas outras cultivares tipo III (BRSMG Amuleto, BRS FC104) denotam estimativas negativas, o que pode estar relacionado ao ciclo (Figura 6).

Figura 6 – Estimativa da Capacidade Geral de Combinação multivariada de cultivares de feijoeiro-comum e estirpes de *Rhizobium*.



Fonte: Da autora (2024)

No estudo de Romanini Junior *et al.*, (2007), a cultivar Pérola mostrou ter facilidade em estabelecer associação com o rizóbio, corroborando com os nossos resultados. Por seu turno, Andraus, Cardoso e Ferreira (2016) verificaram que a cultivar BRS Estelo apresenta maior MSN. Avaliando a CGC dessa cultivar para esta característica, observou-se uma estimativa negativa (Tabela 8). Este resultado evidencia o grande efeito do ambiente sobre o macrossimbionte e ilustra as dificuldades na obtenção de respostas de uma única eficiência. A cultivar BRSMG Uai foi considerada por Oliveira *et al.* (2022) como um genótipo de alta capacidade de nodulação, com base ao número de nódulos e MSN. Enfatizando-se apenas a

MSN os resultados aqui apresentados são congruentes a esses autores, uma vez que a cultivar apresentou a maior estimativa para essa característica (Tabela 8).

As cultivares que apresentam maiores IZ, não necessariamente apresentaram as melhores estimativas para todas as características avaliadas, como é o caso das cultivares BRS FC406 e BRSMG Marte (Figura 6), que embora tenham apresentado os melhores índices, denota valores de baixa magnitude de CGC para MSN e NVV (Tabela 8). No caso desta última cultivar, a contribuição maior para o valor do IZ foi obtida em função da MSPA e MSR, podendo a arquitetura vegetal e os hábitos de crescimento afetarem a produção de biomassa vegetal (OLIVEIRA, 2022). Ademais, as diferenças na massa seca da parte aérea podem não ter uma adesão estrita às taxas simbióticas de N<sub>2</sub> (ARAÚJO, TEIXEIRA e ALMEIDA, 1998). Considerando as estimativas da CGC do IZ, assim como a contribuição de cada variável para este, as cultivares BRS Estilo, BRS Esteio, BRS FC 402, BRS FC414, BRS FP403, Pérola, BRSMG Uai e BRSMG Zape obtiveram as melhores respostas para a CGC.

Em relação as estimativas de CGC para o NVV, observa-se que as cultivares do grupo preto (BRS Esteio e BRS FP403) apresentam as maiores relações (Tabela 8). Uma hipótese quanto a isso pode estar relacionada a cor do tegumento, ressaltando que a maior quantidade de compostos fenólicos como os flavonoides, em *Phaseolus vulgaris*, estão localizados principalmente no tegumento e desta forma, a quantidade e composição destes, determinam a cor do tegumento. Portanto grãos com a pigmentação preta possuem maiores teores de compostos fenólicos do que aqueles com tegumento de cor clara (GUZMÁN *et al.*, 2007). Assim, a cor pode ser um indicador das concentrações desses compostos, mas não é um parâmetro conclusivo, pois genótipos com tegumento da mesma cor, apresentaram teores de compostos fenólicos totais diferentes (CORZO-RÍOS *et al.*, 2020). Neste sentido, vale ressaltar que a exsudação de compostos fenólicos é um dos processos que envolvem a simbiose com os rizóbios.

Entre as estirpes, CIAT 899 e UFLA 02-100 apresentaram as maiores estimativas de CGC (Figura 6). A especificidade hospedeira representa a habilidade de uma estirpe de rizóbio em provocar a nodulação e, ou, fixar N quando associada a cultivares ou espécies do hospedeiro específico, sendo por isso, uma importante característica a ser considerada em programas de seleção de novas estirpes (PERES *et al.*, 1993). A estirpe UFLA 02-127 demonstrou característica de maior especificidade (Apêndice A) entre as cultivares, sendo a única com a estimativa multivariada negativa. Neste caso, esta característica torna-se um fator limitante, visto que a escolha de estirpes que apresentem baixa especificidade é recomendável,

considerando que a variabilidade genética entre os cultivares de leguminosas tem sido apontada como uma das causas que afetam a eficiência fixadora de  $N_2$  das estirpes durante a simbiose.

A estirpe CIAT 899 é fundamentalmente caracterizada pela ampla faixa de hospedeiros e neste estudo evidenciou-se também essa característica na estirpe UFLA 02-100, com uma magnitude de CGC muito similar a esta estirpe (IZ). A característica destas estirpes se associarem a uma gama de hospedeiros, neste caso, em diferentes cultivares de feijoeiro-comum está associada a capacidade de reconhecer diferentes flavonoides, logo, a presença de mais de um *nodD* no genoma está geralmente associada a este potencial (WALKER, LAGUNAS e GIFFORD, 2020).

Portanto, considerando as condições de casa de vegetação sob as quais este estudo foi conduzido, a inoculação de feijoeiro-comum (com cultivares responsivas e estirpes selecionadas de *Rhizobium*) figura-se uma alternativa possível para substituição parcial do N-mineral cultura. A estirpe UFLA 02-100 tem potencial para recomendação como inoculante comercial para sementes de feijoeiro-comum, podendo contribuir na redução de fertilizantes agrícolas aplicados.

Como intuito de otimizar o manejo da adubação nitrogenada na cultura, respaldado pelo presente estudo e considerando o pico de atividade das enzimas nitrogenase e redutase do nitrato, respectivamente, pela FBN e pela assimilação do nitrogênio mineral do solo, uma opção seria realizar a inoculação, considerando a maior eficiência da FBN no início do ciclo e, dependendo da relação custo/benefício, efetuar adubação com fertilizante nitrogenado no início da floração que compreenderá no pico de atividade da redutase do nitrato.

### 3.2 Experimento a campo

Considerando as estimativas da CGC, as cultivares BRS Esteio, BRS FC 402, BRS FC414, BRS FP403, Pérola, BRSMG Uai e BRSMG Zape e a estirpe UFLA 02-100 foram selecionadas e avaliadas em condições de campo. As variâncias residuais foram consideradas homogêneas e a análise conjunta dos dados adequada (GOMES; GARCIA, 2002). Neste estudo, o CV para todas as características foi considerado muito alto, exceto para a variável PCG (PIMENTEL-GOMES, 2009). No entanto, considerando-se a acurácia como métrica, a precisão experimental é considerada de média a alta magnitude, exceto para MSN e N ( $F_c < 1$ ) (RESENDE; DUARTE, 2007) (Tabela 9).

Tal fato atribui-se visto que a acurácia considera o valor de  $F_c$  (QMT/QME), além de levar em consideração a variação entre as cultivares, não apenas o erro experimental, como é

feito no cálculo do CV. Assim, com valores mais altos de Fc, serão obtidos valores mais precisos. Coeficientes de variação acima de 20% para essas características também foram relatados em outros estudos (CARVALHO *et al.*, 2022; OLIVEIRA *et al.*, 2017).

Tabela 9- Resumo da análise de variância conjunta relacionada à avaliação de cultivares e fontes de nitrogênio em Lavras e Carrancas.

FV	GL	Pr > (F <sub>c</sub> )						
		MSPA	MSR	MSN	N	PCG	NV	PROD
Local (L)	1	0,0000*	0,0002*	0,0000*	0,0000*	0,0166*	1,0000 <sup>ns</sup>	0,000*
Cultivar (C)	6	0,0257*	0,0006*	0,7640 <sup>ns</sup>	0,8311 <sup>ns</sup>	0,0000*	0,0050*	0,2054 <sup>ns</sup>
Fontes de N (FN)	3	0,0029*	0,0003*	0,0075*	0,4264 <sup>ns</sup>	0,3994 <sup>ns</sup>	0,0000*	0,0000*
Estirpe (E)	1	0,0593 <sup>ns</sup>	0,1190 <sup>ns</sup>	0,6381 <sup>ns</sup>	0,1953 <sup>ns</sup>	0,9330 <sup>ns</sup>	0,0244*	0,0390*
E vs CN	1	0,1734 <sup>ns</sup>	0,0052*	0,0528 <sup>ns</sup>	0,9480 <sup>ns</sup>	0,1059 <sup>ns</sup>	0,0001*	0,0017*
E vs SN	1	0,0181*	0,0600 <sup>ns</sup>	0,0410*	0,3388 <sup>ns</sup>	0,9468 <sup>ns</sup>	0,0000*	0,5690*
FN x C	18	0,6097 <sup>ns</sup>	0,9485 <sup>ns</sup>	0,0149*	0,0008*	0,5000 <sup>ns</sup>	0,0013*	0,0137*
FN x L	3	0,0229*	0,0230*	0,0057*	0,1547 <sup>ns</sup>	0,0897 <sup>ns</sup>	1,0000 <sup>ns</sup>	0,0015*
CV (%)		55,99	31,14	95,68	31,07	8,08	30,25	24,93
R <sub>gg</sub> (C)		0,77	0,87	0,00	0,00	0,95	0,83	0,55

CN: Com nitrogênio; SN: Sem nitrogênio.

\*Significativo pelo teste F (p<0,05)

<sup>ns</sup>Não significativo

MSPA: Matéria seca da parte aérea; MSR: Matéria seca radicular; MSN: Matéria seca de nódulos; N: Teor de nitrogênio; PCG: Peso de cem grãos ; NV: Número de vagens; PROD: Produtividade.

Fonte: Da autora (2024).

Na análise de variância conjunta, verificou-se significância da interação das fontes de N em função do local e das cultivares para as variáveis MSPA, MSR, MSN, NV e PROD. Não houve diferença estatística para as variáveis N e PCG em função do local na interação FN x L, todavia, a produtividade foi influenciada. Os experimentos foram conduzidos em duas áreas contrastantes, sendo uma já consolidada pelo cultivo de feijão e outras culturas, e a outra sem histórico de cultivo. Contudo, em termos de fertilidade, as condições químicas destas muito se assemelham, sendo as maiores diferenças nos teores de Mg, Fe e Zn. No solo cultivado em Lavras, a disponibilidade de Fe e Mg foi considerada baixa, podendo ser este um fator limitante da FBN nesta área (Tabela 10).

A nodulação (MSN) variou entre os locais de cultivo em estudo. Em Carrancas, os valores de MSN foram aproximadamente três vezes maiores que os registrados em Lavras, o que refletiu no teor de N nas folhas, sendo a diferença na mesma proporção (Tabela 10). Observa-se melhor resposta da nodulação em área sem histórico de inoculação. O solo cultivado em Lavras caracteriza-se pelo cultivo da soja e inoculação com *Bradyrhizobium japonicum*, sendo o feijoeiro-comum um hospedeiro promiscuo (SHAMSELDIN; VELÁZQUEZ, 2020).

Possivelmente pode ter ocorrido a ocupação de nódulos por esse microssimbionte, mas com menor eficiência. No caso do *Bradyrhizobium*, o feijoeiro-comum pode formar um grande número de nódulos, às vezes associados a uma massa seca de nódulo; entretanto, são amorfos, sem atividade de nitrogenase e, portanto, ineficientes (MARTÍNEZ *et al.*, 1985; MICHIELS *et al.*, 1998).

Tabela 10 - Matéria seca da parte aérea, matéria seca radicular, matéria seca de nódulos, teor de nitrogênio e peso de cem grãos, número de vagens e produtividade de cultivares de feijoeiro-comum inoculado com diferentes estirpes de *Rhizobium* em dois locais.

Local	MSPA <sup>3</sup>	MSR <sup>3</sup>	MSN <sup>3</sup>	N <sup>3</sup>	PCG	NV <sup>3</sup>	PROD
Carrancas <sup>1</sup>	17,16 a	2,74 b	0,60 a	3,30 a	29,23 a	14,75 a	1997,02 a
Lavras <sup>1</sup>	25,11 b	3,22 a	0,26 b	1,45 b	28,48 b	14,75 a	666,16 b
FN	Carrancas <sup>2</sup>		Lavras <sup>2</sup>				
	MSPA	MSR	MSR	MSPA	NV		
CIAT 899	17,94 a	2,81 a			2,80 b	21,05 c	13,83 b
UFLA 02-100	20,40 a	2,86 a			3,30 b	27,09 b	15,75 a
S N-Mineral	14,11 a	2,46 a			2,85 b	19,91 c	11,46 b
C N-Mineral	16,18 a	2,85 a			3,93 a	32,40 a	17,98 a

<sup>1</sup>Médias seguidas mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste F (p < 0,05).

<sup>2</sup>Médias seguidas da mesma letra, na coluna, pertencem ao mesmo grupo pelo teste Scott-Knott (p < 0,05).

<sup>3</sup>mostragem de três plantas por parcela.

FN: Fontes de N; MSPA: Matéria seca da parte aérea (g); MSR: Matéria seca radicular (g); MSN: Matéria seca de nódulos (g); N: Teor de nitrogênio (%); PCG: Peso de cem grãos (g); PROD: Produtividade (kg ha<sup>-1</sup>); NV: Número de vagens. S N – Sem adubação de N; C N: Com adubação de N.

Fonte: Da autora (2024)

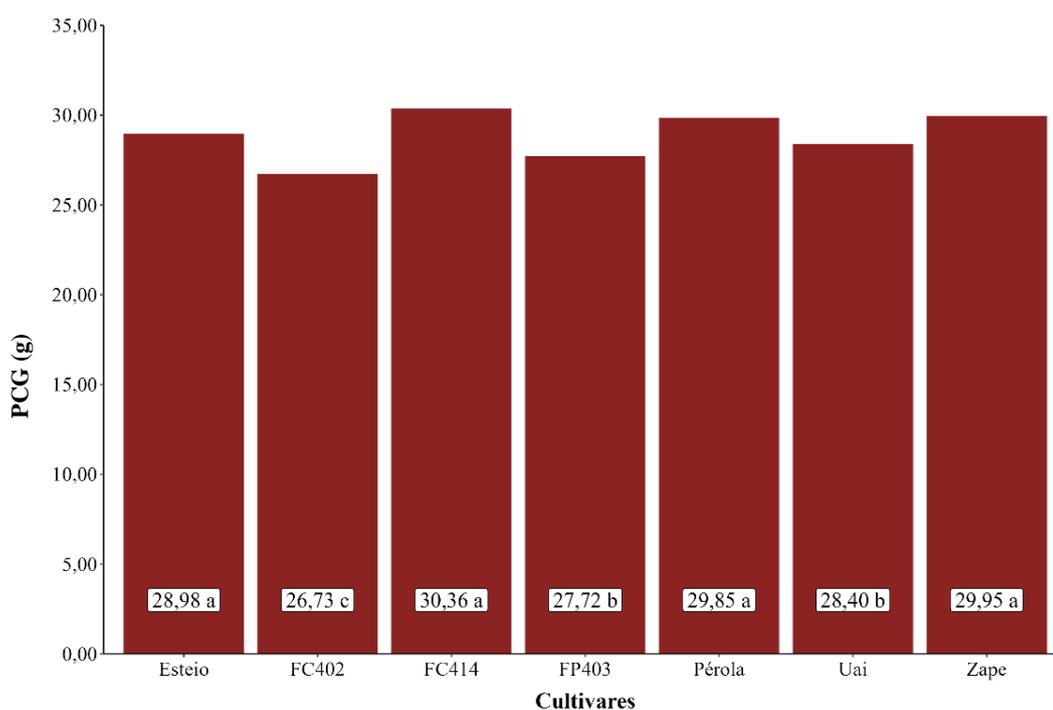
Considerando as fontes de nitrogênio em função do local, para as variáveis MSPA e MSR, em Carrancas, não houve diferença significativa para nenhuma das variáveis. Por seu turno, em Lavras, a melhor resposta foi obtida com a adubação mineral com N. Para as outras variáveis, houve interação significativa com o fator cultivar. A identificação de genótipos de feijoeiro-comum mais responsivos à FBN permite a aplicação da inoculação com *Rhizobium* sob diferentes condições tecnológicas.

Em estudo de campo, foi relatado que algumas cultivares são mais efetivas à inoculação com *Rhizobium*, logo, eminentes na FBN, enquanto outras têm melhor desempenho perante a fertilização nitrogenada em termos de produtividade (YAGI *et al.*, 2015). A variável NV foi avaliada apenas em um local (Lavras) e foi influenciada pela fonte de N, com as melhores respostas obtidas com a adubação mineral e a inoculação com a estirpe UFLA 02-100. O número de vagens por planta é uma característica que varia em função da cultivar e do ambiente

de produção (SANTIS *et al.*, 2019) , neste caso, torna-se evidente a contribuição da inoculação com *Rhizobium* sobre essa característica.

O PCG não foi influenciado pela interação FN x C, mas variou de acordo com o genótipo (Figura 7). A cultivar BRS FC 402 apresentou a menor massa de sementes, com a média de 26,73 g. Todavia, este valor está de acordo com a sua média de referência (MELO *et al.*, 2017). Em relação ao grupo de cultivares de maior peso, o ganho adicional em relação à média de referência é em torno de 3 g, no entanto, o PCG é uma característica pouco influenciada pelo ambiente, de herança qualitativa, controlada por poucos genes (RAMALHO; SANTOS; ZIMMERMANN, 1993), explicando assim o resultado da análise de variância para esse caráter em função do local.

Figura 7 – Peso de cem grãos em cultivares de feijoeiro-comum.



Médias seguidas da mesma letra, na coluna, pertencem ao mesmo grupo pelo teste Scott-Knott ( $p < 0,05$ )

No desdobramento da interação FN x C para a variável PROD, na análise conjunta dos dados, a inoculação com *Rhizobium* promove produtividades similares a adubação, todavia, observa-se variabilidade entre as cultivares quanto à resposta para a fonte de N (Figura 8). As cultivares mais responsivas a inoculação foram a BRS Esteio, Pérola, BRSMG Zape e BRSMG Uai, considerando apenas a média fenotípica. A cultivar BRSMG Zape figura-se limitante à

simbiose com estirpe CIAT 899 e a Pérola, teve a produtividade comprometida pela falta de inoculação e adubação nitrogenada.

Figura 8 - Matéria seca de nódulos (g), teor de nitrogênio (%), número de vagens e produtividade de grãos (kg ha<sup>-1</sup>) cultivares de feijoeiro-comum inoculado com diferentes estirpes de *Rhizobium*.

	MSN				N				Z score
	CIAT-899	UFLA02-100	Sem N	Com N	CIAT-899	UFLA02-100	Sem N	Com N	
Zape	0,52 aA	0,62 aA	0,60 aB	0,43 aA	2,56 aA	2,12 aA	2,27 aA	2,56 aA	
Uai	0,05 bA	0,46 bA	1,04 aA	0,10 bA	2,37 aA	2,30 aA	2,60 aA	2,70 aA	
Pérola	0,33 aA	0,46 aA	0,50 aB	0,31 aA	1,81 bB	2,51 aA	2,92 aA	2,11 bA	
FP403	0,69 aA	0,32 aA	0,30 aB	0,50 aA	2,01 aB	2,52 aA	2,12 aA	2,29 aA	
FC414	0,52 aA	0,33 aA	0,46 aB	0,26 aA	2,63 aA	2,20 aA	2,32 aA	2,77 aA	
FC402	0,39 aA	0,59 aA	0,45 aB	0,12 aA	1,75 bB	2,42 aA	2,45 aA	2,70 aA	
Esteio	0,33 aA	0,32 aA	0,63 aB	0,37 aA	2,64 aA	2,95 aA	2,56 aA	1,32 bB	
	NV				Prod				
Zape	15,83 aA	15,33 aB	13,42 aA	14,92 aB	1.009,46bA	1.577,72aA	1.579,88aA	1.704,16aA	
Uai	17,25 aA	13,92 bB	10,92 bA	16,83 aB	1.211,04aA	1.418,86aA	1.307,25aA	1.530,66aA	
Pérola	12,08 bA	19,17 aA	12,17 bA	21,00 aA	1.345,59aA	1.472,94aA	979,04 bB	1.207,45bA	
FP403	14,50 aA	14,75 aB	9,42 bA	16,00 aB	1.245,14bA	1.258,93bA	1.108,69bB	1.552,67aA	
FC414	10,50 bA	16,50 aA	10,75 bA	13,25 bB	1.172,19bA	1.271,11bA	1.202,93bB	1.613,86aA	
FC402	13,92 cA	18,25 bA	11,75 cA	23,83 aA	1.147,30aA	1.314,75aA	1.373,44aA	1.503,97aA	
Esteio	12,75 bA	12,33 bB	11,83 bA	20,00 aA	1.411,59aA	1.142,06aA	1.214,33aB	1.407,43aA	

MSN: Massa da matéria seca de nódulos; NV: Número de vagens; N: Teor de nitrogênio; Prod: Produtividade de grãos. Médias seguidas da mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, pertencem ao mesmo grupo pelo teste de Scott-knott.(p<0,05).

Fonte: Da autora (2024).

Ao trabalhar com a cultivar Pérola, Pelegrin *et al.* (2009) constataram a necessidade da adubação com 20 kg ha<sup>-1</sup> de N na sementeira, associada à inoculação com rizóbio, para possibilitar a obtenção de rendimento de grãos e receita líquida equivalente à aplicação de 160 kg ha<sup>-1</sup> de N. Neste estudo, a inoculação com a estirpe UFLA 02-100 promoveu um incremento em torno de 266 kg ha<sup>-1</sup> para a cultivar Pérola em relação à adubação de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, e para eficiência da população nativa de rizóbios, a diferença estatística foi de aproximadamente 500 kg ha<sup>-1</sup>, com superioridade para esta mesma estirpe. As estimativas da CGC obtidas anteriormente (Tabela 8), corroboram com estes resultados (Figura 8).

A BRSMG Uai é uma cultivar na qual seu potencial de FBN ainda é pouco evidenciado, destacando a importância do presente estudo. Este genótipo apresentou alta capacidade de nodulação (MSN), todavia sugere-se elevado potencial de promiscuidade. Oliveira *et al.* (2022) avaliando esta cultivar quanto a performance simbiótica, concluiu o seu potencial para inclusão em programas de melhoramento direcionados ao melhoramento da FBN, obtendo resposta relevante com a inoculação com a estirpe CIAT 899, com produtividade equivalente de 2900 kg ha<sup>-1</sup>, não se diferenciado da média obtida com a adubação mineral.

A diferença de produtividade entre os dois estudos deve ser considerada; os experimentos de Oliveira *et al.* (2022) foram conduzidos sob sistema de plantio direto, com o nível tecnológico quatro para a cultura do feijoeiro-comum, o que difere do presente estudo e não condiz com perfil agrícola da cadeia produtiva do feijão, no qual majoritariamente é oriunda da agricultura familiar, perante ao baixo aporte tecnológico. Os rendimentos elevados da inoculação (3100 kg ha<sup>-1</sup>) geralmente, apenas são alcançados em sistemas agrícolas tecnologicamente avançados. Deve-se destacar, contudo, que os rendimentos do presente estudo com a inoculação com a estirpe UFLA 02-100, para todas as cultivares, foram maiores que a média nacional, de 1129 kg ha<sup>-1</sup>.

A eficácia da FBN em condições de campo é resultante de muitos fatores: ambiente (componentes físicos, químicos e biológicos do solo, condições climáticas durante a vegetação), qualidade da semente, compatibilidade do genótipo com cepas de rizóbios, potencial genético da planta hospedeira para FBN, bem como a eficiência de bactérias nodulares, sendo, portanto, uma característica fortemente condicionada pelo o ambiente, todavia, um desafio alcançável no melhoramento de plantas (PACHECO *et al.*, 2020).

A estirpe UFLA 02-100 mostrou-se eficiente no campo, com alto potencial competitivo, refletindo em produtividade e com resposta equivalente à inoculação com a estirpe comercial CIAT 899. A adubação com N mineral é frequentemente empregada na cultura do feijoeiro em sistemas irrigados, além disso, a inoculação com cepas comerciais de rizóbios é raramente utilizada, embora estejam disponíveis estudos que mostram respostas potenciais à inoculação (VARGAS *et al.* 2000; MOSTASSO *et al.*, 2002; BRITO *et al.*, 2015; MOREIRA *et al.*, 2017). O presente estudo sugere que a prática da inoculação com rizóbio pode proporcionar rendimentos similares a adubação mineral, desde que as condições de crescimento sejam adequadas.

#### 4 CONCLUSÕES

Há diferença nos efeitos das cultivares de feijoeiro-comum e estirpes de *Rhizobium* quanto a resposta para a FBN.

A análise dialélica entre as cultivares e estirpes de *Rhizobium* revela a predominância dos efeitos aditivos nas características relacionadas à FBN;

Existe variabilidade entre os genótipos de feijoeiro-comum, indicando potencial ganho genético em seleção para aumentar a capacidade biológica de fixação de nitrogênio;

A inoculação com *Rhizobium* promove incrementos na produtividade de forma equivalente a adubação mineral.

A estirpe UFLA 02-100 tem potencial para uso como inoculante na cultura do feijoeiro-comum.

As cultivares BRS Esteio, Pérola, BRSMG Zape e BRSMG Uai figuram-se eficientes a FBN.

## REFERÊNCIAS

- AGOYI, E.E. et al. **Mode of inheritance of promiscuous nodulation and combining abilities in soybean genotypes**. International Journal of Agronomy and Agricultural Research (IJAAR), v. 9, n. 1, p. 73-82, 2016. Disponível: [https://www.researchgate.net/publication/305567556\\_Mode\\_of\\_inheritance\\_of\\_promiscuous\\_nodulation\\_and\\_combining\\_abilities\\_in\\_soybean\\_genotypes](https://www.researchgate.net/publication/305567556_Mode_of_inheritance_of_promiscuous_nodulation_and_combining_abilities_in_soybean_genotypes). Acesso em: 12 jan. 2024.
- AGUILAR, O.M; COLLAVINO, M.M.; MANCINI, U. Nodulation competitiveness and diversification of symbiosis genes in common beans from the American centers of domestication. Scientific Reports, 2021. DOI: 10.1038/s41598-022-08720-0
- ANDRADE, N.; MURPHY, P.J; GILLER, K.E. **Diversity and abundance of populations of bean-nodulating rhizobia as a function of liming and cropping history in acidic Brazilian soils**. In: PEDROSA, F.O.; HUNGRIA, M.; YATES, M.G. & NEWTON, W.E., eds. Nitrogen Fixation: from molecules to crop productivity. Dordrecht, Kluwer, 2000. 546 p.
- ANDRAUS, M. P.; CARDOSO, A. A.; FERREIRA, E. P. B. **Differences in nodulation and grain yield on common bean cultivars with different growth cycles**. Communications in Soil Science and Plant Analysis, v.47, p.1148-1161, 2016. DOI: 10.1080/00103624.2016.1166376.
- ARAÚJO, A.P.; TEIXEIRA, M.G.; ALMEIDA, D.L. de. **Variability of traits associated with phosphorus efficiency in wild and cultivated genotypes of common bean**. Plant and Soil, v.203, p.173-182, 1998. DOI: 10.1023/a:1004398930218.
- ARF, O; LEMOS, L.B.; SORATTO, R.P.; FERRARI, S. (Ed.). **Aspectos gerais da cultura do feijão: *Phaseolus vulgaris* L.** Botucatu: UNESP/FEPAP, 2015. 443 p.
- BARRON, E et al. **Response to selection for seed yield and nitrogen (N<sub>2</sub>) fixation in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.)**. Field Crops Research, v. 62, n. 2-3, p. 119-128, 1999. DOI: 10.1016/S0378-4290(99)00009-X.
- BENATI, J.A; NAVA, G.; MAYER, N.A. **Índice Spad para diagnóstico do status de nitrogênio em pêssego 'Esmeralda'**. Revista brasileira de fruticultura , v. 43, n. 1, 2021. DOI: 10.1590/0100-29452021093.
- BRITO, L. F. DE et al. **Resposta do Feijoeiro Comum à Inoculação com Rizóbio e Suplementação com Nitrogênio Mineral em Dois Biomas Brasileiros**. Revista brasileira de ciencia do solo, v. 39, n. 4, p. 981–992, 2015. DOI: 10.1590/01000683rbc20140322.
- BUTTERY, B. R.; PARK, S. J.; BERKUM, P. V. **Effects of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivar and *Rhizobium* strain on plant growth, seed yield and nitrogen content**. Canadian Journal of Plant Science, v. 77, n. 3, p. 347-351, 1997. DOI: 10.4141/P96-088.
- CÂMARA, G. M. **Fixação biológica de nitrogênio em soja**, 2014. Disponível em: <<http://www.ipni.net/publication/ia->

brasil.nsf/0/B7FB85D4FAD745CF83257D660046A90D/\$FILE/Page1-9-147.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2024.

CARGNELUTTI FILHO, A.; STORCK, L.; RIBEIRO, ND **Medidas de precisão experimental em ensaios com genótipos de feijão e soja**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 44, n. 10, p. 1225–1231, 2009. Disponível: <https://www.scielo.br/j/pab/a/wfC3jX9hY3LfD7Bd9SDpQbF/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 13 Jan. 2024.

CARVALHO, J. P. S. et al. **Combining abilities of soybean progenies and brady *Rhizobium* strains for biological nitrogen fixation**. Crop Science, v. 63, p. 29-43, 2022. DOI: 10.1002/csc2.20735.

CECCATTO, V. M. et al. **Effects of host plant origin on nodulin activities and nitrogen fixation in *Phaseolus vulgaris* L.** Plant and Soil, v. 204, p. 79–88, 1998. DOI: 10.1023/A:1004331011493.

CHEKANAI, V.; CHIKOWO, R.; VANLAUWE, B. **Response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) to nitrogen, phosphorus and rhizobia inoculation across variable soils in Zimbabwe**. Agriculture, ecosystems & environment, v. 266, p. 167–173, 2018. DOI: 10.1016/j.agee.2018.08.010

CHEKANAI, V.; CHIKOWO, R.; VANLAUWE, B. **Response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) to nitrogen, phosphorus and rhizobia inoculation across variable soils in Zimbabwe**. Agriculture, ecosystems & environment, v. 266, p. 167–173, 2018. DOI: 10.1016/j.agee.2018.08.010.

CORZO-RÍOS, L. J. et al. **Effect of cooking on nutritional and non-nutritional compounds in two species of *Phaseolus* (*P. vulgaris* and *P. coccineus*) cultivated in Mexico**. International Journal of Gastronomy and Food Science, v. 20, p. 1-7, 2020.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G. de; FERREIRA, E. **Classificação e tendências climáticas em Lavras, MG. Ciência e Agrotecnologia**, [S.L.], v. 31, n. 6, p. 1862-1866, dez. 2007. DOI: 10.1590/s1413-70542007000600039.

DICENZO, G. C. et al. **Multidisciplinary approaches for studying *Rhizobium*–legume symbioses**. Canadian journal of microbiology, v. 65, n. 1, p. 1–33, 2019. DOI: 10.1139/cjm-2018-0377.

DÖBEREINER, J.; BALDANI, V.L.D.; BALDANI, J.I. **Como isolar e identificar bactérias diazotróficas de plantas não leguminosas**. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI, 1995. 60 p.

FAQUIM, V.; VALE, F.R.; NETO FURTINI, A.E. **Cultivo de plantas em ambiente controlado: solução nutritiva, hidroponia e em vasos com solo**: Universidade Federal de Lavras (Nutrição Mineral de Plantas), 2012. Disponível em: [https://dcs.ufla.br/images/imagens\\_dcs/pdf/Prof\\_Faquim/PCG%20503%20Exercicios%20Hidr%20oPGad%202011.pdf](https://dcs.ufla.br/images/imagens_dcs/pdf/Prof_Faquim/PCG%20503%20Exercicios%20Hidr%20oPGad%202011.pdf). Acesso em: 21 out. 2022.

FERREIRA et al. **Capacidade de combinação em sete populações de melancia**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 37, n. 7, p. 963-970, 2002.

FERREIRA, M. G. et al. **Selection of squash “Menina Brasileira” carrying the allele “Bush” with high yield potential.** Horticultura brasileira, v. 37, n. 1, p. 35–39, 2019. DOI: 10.1590/S0102-053620190105.

FERREIRA, P.A.A et al. **Inoculação com cepas de rizóbio na cultura do feijoeiro.** Ciência Rural, v.39, n.7, p.2210-2212, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/MpYbyqVsTVs4QGhwFDnsXTd/?format=pdf>. Acesso em: 12 jan. 2024

FIGUEIREDO, M. A. DE et al. **Nitrogen and molybdenum fertilization and inoculation of common bean with *Rhizobium* spp. in two oxisols.** Acta Scientiarum Agronomy, v. 38, n. 1, p. 85, 2016. DOI: 10.4025/actasciagron.v38i1.26661.

FLORENTINO, L. A *et al.*, **Sesbania virgata stimulates the occurrence of its microsymbiont in soils but does not inhibit microsymbionts of other species.** Scientia Agricola, Piracicaba, v. 66, n. 5, p. 667-676, Sept. 2009.

FONSECA, G. G. et al. **Resposta de cultivares de feijoeiro-comum à inoculação das sementes com duas estirpes de rizóbio.** Bioscience journal (Online), p. 1778–1787, 2013.

FRANCO, M. C. et al. **Nodulação em cultivares de feijão dos conjuntos gênicos andino e meso-americano.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, [S.L.], v. 37, n. 8, p. 1145-1150, ago. 2002. DOI: 10.1590/s0100-204x2002000800012.

GUZMÁN, N. E et al. **Antioxidant and antimutagenic activity of phenolic compounds in three different colour groups of common bean cultivars (*Phaseolus vulgaris*),** Food Chemistry, v.103, n.2, p. 521-527, 2007.

HALLAUER, A.R.; MIRANDA FILHO, J.B. **Quantitative genetics in maize breeding.** 2nd ed. Ames: Iowa State University Press, 1988. 468 p.

HARDARSON, G. et al. **Genotypic variation in biological nitrogen fixation by common bean.** Plant and Soil, v.152, p.59-70, 1993. DOI:

HARTWIG, U. A. **The regulation of symbiotic N<sub>2</sub> fixation: a conceptual model of N feedback from the ecosystem to the gene expression level.** Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, v. 1, p. 92-120, 1998.

HERRIDGE, D.F.; REDDEN, R.J. **Evaluation of genotypes of navy and culinary bean (*Phaseolus vulgaris* L.) selected for superior growth and nitrogen fixation.** Australian Journal of Experimental Agriculture, v.39, p. 975–980, 1999. DOI: 10.1071/EA99108.

HUNGRIA, M. et al. **Isolation and characterization of new efficient and competitive bean (*Phaseolus vulgaris* L.) rhizobia from Brazil.** Soil biology & biochemistry, v. 32, n. 11–12, p. 1515–1528, 2000.

HUNGRIA, M. et al. **Isolation and characterization of new efficient and competitive bean (*Phaseolus vulgaris* L.) rhizobia from Brazil.** Soil Biology. Biochem., v. 32, p. 1515-1528, 2000.

JONES JR, J.B. **Kjeldahl nitrogen determination-What's in a name.** Journal of Plant Nutrition, v.10, p.1675-1682, 1987.

KAMFWA, K.; CICHY, K.A; KELLY, J.D. **Genome-wide association analysis of symbiotic nitrogen fixation in common bean.** Theoretical and Applied Genetics, v. 128, p. 1999–2017, 2015. DOI: DOI: 10.1007/s00122-015-2562-5.

KAWAKA, F.; MUOMA, J. **Distribution and phenotypic characteristics of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) nodulating bacteria in diverse soils.** Acta agriculturae Scandinavica. Section B, Soil and plant science, v. 70, n. 7, p. 564–571, 2020. DOI: 10.1080/09064710.2020.1807595.

KIKUTI, H et al., **Nitrogênio e fósforo em feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) variedade cultivada BRS MG Talismã.** Acta Scientiarum, v.27, p.415 422, 2005.

LEITE, M.E. et al. **Increasing the resistance of common bean to white mold through recurrent selection.** Scientia Agricola, v. 73, n. 1, p. 71–78, 2016.

LOPES, F.S. et al. **Recurrent selection in common bean aiming at resistance to white mold in a greenhouse.** Crop Breeding and Applied Biotechnology, v. 19, n. 1, p. 95–101, 2019. DOI: 10.1590/1984-70332019v19n1a13.

MARTÍNEZ, E. et al. **Reiteration of nitrogen fixation gene sequences and specificity of *Rhizobium* in nodulation and nitrogen fixation in *Phaseolus vulgaris*.** Journal of General Microbiology, v. 131, p. 1779-1786, 1985.

MARTINEZ-ROMERO, E. et al. ***Rhizobium tropici*, a Novel Species Nodulating *Phaseolus vulgaris* L. Beans and *Leucaena* sp.** Trees. International journal of systematic bacteriology, v. 41, n. 3, p. 417–426, 1991. DOI: 10.1099/00207713-41-3-417.

MATOSO, S. C. G.; KUSDRA, J. F. **Nodulação e crescimento do feijoeiro em resposta à aplicação de molibdênio e inoculante rizobiano.** Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/SkwJWYjKs9hhJbhWJddyKmN/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 19 jan. 2024.

MELO, L. C. et al. **BRS FC402: Cultivar de Feijão-Comum Carioca com Alta Produtividade, Resistência à Antracnose e Murcha-de-Fusário.**2017. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/158117/1/34755.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2024.

MELO, L.C.; DOS SANTOS, J.B. **Identification of resistant genotypes considering polygenic systems in host-pathogen interaction.** Genetics and Molecular Biology, [S.l.], v. 22, n. 4, p. 601–608, 1999. DOI: 10.1590/S1415-47571999000400022.

MENDES, F.F.; RAMALHO, M.A.P.; ABREU, A.F.B. **Selection index for choosing segregating populations in common bean.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, [S.l.], v. 44, n. 10, p. 1312-1318, 2009.

MENDOZA-SUÁREZ, M. et al. **Competition, nodule occupancy, and persistence of inoculant strains: Key factors in the *Rhizobium*-legume symbioses.** Frontiers in plant science, v. 12, p. 1-26, 2021. DOI: 10.3389/fpls.2021.690567.

MICHIELS J. et al. ***Phaseolus vulgaris* is a non-selective host for nodulation.** FEMS Microbiology Ecology, v. 26, p. 193-205, 1998.

MILCHESKI, V. de F. et al. **Influence of common bean genotypes and rhizobia interaction for nodulation and nitrogen fixation.** Revista de Ciências Agroveterinárias, [S.L.], v. 21, n. 1, p. 8-15, 4 mar. 2022. DOI: 10.5965/223811712112022008.

MOREIRA, F.M.S., TIEDJE, J.; MARSH, T.L. **Burkholderia spp. are among fast growing symbiotic diazotrophs isolated from diverse land use systems in Amazônia and from Brazilian Leguminosae Forest species.** In: Memórias da reunião latinoamericana de rizobiologia, Cocoyoc, México, p.45-46, 2002.

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Fixação Biológica de Nitrogênio.** Microbiologia e Bioquímica do Solo, 2ª edição, Editora UFLA, 729 p, 2006.

MOREIRA, L. P. et al. **Nodulation, contribution of biological N<sub>2</sub> fixation, and productivity of the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) inoculated with rhizobia isolates.** Australian journal of crop science, v. 11, n. 06, p. 644–651, 2017. DOI: 10.21475/ajcs.17.11.06.p310.

MORRIES, P. **A century of Kjeldahl (1883-1983).** Journal of the Association of Public Analysts, v.21, p.53-58, 1983.

MOSTASSO, L. et al. **Selection of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) rhizobial strains for the Brazilian Cerrados.** Field crops research, v. 73, n. 2–3, p. 121–132, 2002. DOI: 10.1016/S0378-4290(01)00186-1.

MOURA, F. T. et al. **So many rhizobial partners, so little nitrogen fixed: the intriguing symbiotic promiscuity of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.).** Symbiosis, [S.L.], v. 86, n. 2, p. 169-185, mar. 2022. DOI: 10.1007/s13199-022-008316.

MWENDA, G. M. et al. **Genetic diversity and symbiotic effectiveness of *Phaseolus vulgaris*-nodulating rhizobia in Kenya.** Systematic and applied microbiology, v. 41, n. 4, p. 291–299, 2018. DOI: 10.1016/j.syapm.2018.02.001

NICOLÁS, M.F.; ARRABAL ARIAS, C.A.; HUNGRIA, M. **Genetics of nodulation and nitrogen fixation in Brazilian soybean cultivars.** Biology and Fertility of Soils, [S.l.], v. 36, n. 2, p. 109–117, 2002. DOI: 10.1007/s00374-002-0511-3.

NOGUEIRA, C.de O. G. et al. **Agronomic efficiency of *Rhizobium* strains from the Amazon region in common bean.** Acta Amazonica, v. 47, p. 273-276, 2017. DOI: 10.1590/1809-4392201603422.

OLIVEIRA, D. et al. **Acid tolerant *Rhizobium* strains contribute to increasing the yield and profitability of common bean in tropical soils.** Journal of soil science and plant nutrition, v. 17, n. 4, p. 922–933, 2017. DOI: 10.4067/S0718-95162017000400007.

OLIVEIRA, D. P. et al. **Inoculation with *Rhizobium tropici* can totally replace N-fertilization in the recently released BRSMG Uai bean cultivar.** Acta Scientiarum Agronomy, v. 44, p. e52475, 2021. DOI: 10.4025/actasciagron.v44i1.52475.

PACHECO, R. S. et al. **Differences in contribution of biological nitrogen fixation to yield performance of common bean cultivars as assessed by the <sup>15</sup>N natural abundance technique.** Plant and soil, v. 454, n. 1–2, p. 327–341, 2020. DOI: 10.1007/s11104-020-04654-6.

PACHECO, R. S. et al. **Differences in contribution of biological nitrogen fixation to yield performance of common bean cultivars as assessed by the <sup>15</sup>N natural abundance technique.** Plant and Soil, v. 454, n. 1/2, p. 327-341, Sept. 2020. DOI: 10.1007/s11104-020-04654-6.

PELEGRIN, R. de et al. **Resposta da cultura do feijoeiro à adubação nitrogenada e à inoculação com rizóbio.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 33, n. 1, p. 219-226, 2009. DOI: 10.1590/S0100-06832009000100023.

PELEGRIN, R. et al. **Resposta da cultura do feijoeiro à adubação nitrogenada e à inoculação com rizóbio,** Revista brasileira de ciência do solo, n, 33, p. 219-226, 2009. Disponível em:

<<https://www.scielo.br/j/rbcs/a/DrY9PQNSLdS5RBSxWFLhBbP/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 14 jan. 2024.

PEREIRA, E.G. et al. **Genotypic, phenotypic and symbiotic diversity amongst rhizobia isolates from *Phaseolus vulgaris* L. growing in the Amazon region.** Biology and Fertility of Tropical Soils, v.38, p.86-87, 1997- 1998.

PEREIRA, P.A.A et al. **Selection for increased nodule number in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.),** 1993. Plant Soil, v. 148, n. p. 203-209, 1993. DOI:10.1007/BF00012858.

PERES, J.R.R et al. **Eficiência e competitividade de estirpes de rizóbio para soja em solos de cerrado.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 17, p. 357-363, 1993.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental.** 15. ed. Piracicaba: ESALQ, 2009. 451 p.

PIRES, L.P.M. et al. **Recurrent weight selection for upright plant architecture in common bean.** Scientia agrícola, [S.l.], v. 71, n. 3, p. 240–243, 2014.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R Development Core Team. **R Foundation for Statistical Computing,** Vienna, 2017.

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

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

RAVEN, P. H.; EVERT, R. F. **Biologia de Plantas** 6 ed, p. 707–710, 2001.

REINPRECHT, Y. et al. **Effects of Nitrogen Application on Nitrogen Fixation in Common Bean Production**. *Front Plant Science*, v. 11, p. 327-345 2020. DOI: 10.3389/fpls.2020.01172.

RESENDE, M.D.V. de; DUARTE, J.B. **Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares**. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v.37, p.182-194, 2007. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/pat/article/view/1867>. Acesso: 11 jan. 2024.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARAES, P. T. G.; ALVAREZ V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5 aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais - UFV, 1999. 359 p.

ROMANINI JUNIOR et al. **Avaliação da inoculação de rizóbio e adubação nitrogenada no desenvolvimento do feijoeiro, sob sistema plantio direto**. *Bioscience Journal*, v. 23, n. 4, p. 74-82, 2007.

RUSCHEL, A. P. et al. **Field evaluation of N<sub>2</sub> -fixation and N-utilization by *Phaseolus* bean varieties determined by 15N isotope dilution**. *Plant Soil*, v.65, n.3 p. 397–407, 1982. DOI:10.1007/bf02375060.

RUSCHEL, A.P. et al. **Field evaluation of N<sub>2</sub>-fixation and N-utilization by *Phaseolus* bean varieties determined by 15N isotope dilution**. *Plant and Soil*, v.65, p.397-407, 1982.

SANTIS, F. et al. **Componentes de produção, produtividade e atributos tecnológicos de cultivares de feijoeiro do grupo comercial carioca**. *Colloquium Agrariae*, v. 15, n. 6, p. 21–30, 2019.

SCOTT, A.; KNOTT, M. **Cluster-analysis method for grouping means in analysis of variance**. *Biometrics*, v.30, n.3, p.507-512, 1974.

SHAMSELDIN, A.; VELÁZQUEZ, E. **The promiscuity of *Phaseolus vulgaris* L. (Common bean) for nodulation with rhizobia: a review**. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*. v. 36, n.5, 16 jan. 2020. DOI: 10.1007/s11274-020-02839-w22.

SHAMSELDIN, A.; VELÁZQUEZ, E. **The promiscuity of *Phaseolus vulgaris* L. (Common bean) for nodulation with rhizobia: a review**. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 36, n. 5, 2020. DOI: 10.1007/s11274-020-02839-w.

SILVA, G.S. et al. **Estimation of genetic progress after eight cycles of recurrent selection for common bean grain yield**. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, [S.l.], v. 10, n. 4, p. 351–356, 2010.

SINGLETON, P. W.; TAVARES, J. W. Inoculation response of legumes in relation to the number and effectiveness of indigenous *Rhizobium* populations. *Applied and environmental microbiology*, v. 51, n. 5, p. 1013–1018, 1986. DOI: 10.1128/aem.51.5.1013-1018.1986.

SLATNI, T. et al. **Growth, nitrogen fixation and ammonium assimilation in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) subjected to iron deficiency.** Plant and soil, v. 312, n. 1–2, p. 49–57, 2008. DOI: 10.1007/s11104-007-9481-4.

SOARES, A. L. DE L. et al. **Eficiência agrônômica de rizóbios selecionados e diversidade de populações nativas nodulíferas em Perdões (MG): II - feijoeiro.** Revista brasileira de ciência do solo, v. 30, n. 5, p. 803–811, 2006. DOI: 10.1590/S0100-06832006000500006.

SOARES, A. L. L. et al. **Eficiência agrônômica de rizóbios selecionados e diversidade de populações nativas nodulíferas em Perdões (MG). I - Caupi.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 30, p. 795-802, 2006.

SOUZA, R. A. DE et al. **Avaliação qualitativa e quantitativa da microbiota do solo e da fixação biológica do nitrogênio pela soja.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 43, n. 1, p. 71–82, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/GYsNC8fY44DtdZrV6gL5MGR/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 10 Jan. 2024.

STACKHOUSE, P. **Nasa power.** Disponível em: <<https://power.larc.nasa.gov/>>. Acesso em: 06 jan. 2024.

TAIZ *et al.* **Fisiologia Vegetal.** 6 Ed, Artmed, Porto Alegre, 2017, 848 p.

THIES, J. E.; SINGLETON, P. W.; BOHLOOL, B. B. **Influence of the size of indigenous rhizobial populations on establishment and symbiotic performance of introduced rhizobia on field-grown legumes.** Applied and environmental microbiology, v. 57, n. 1, p. 19–28, 1991.

TULLIO, L. D. et al. **Revealing the roles of y4wF and tidC genes in *Rhizobium tropici* CIAT 899: biosynthesis of indolic compounds and impact on symbiotic properties.** Archives of microbiology, v. 201, n. 2, p. 171–183, 2019. DOI: 10.1007/s00203-018-1607-y.

VARGAS, M.; MENDES, I. C.; HUNGRIA, M. **Response of field-grown bean (*Phaseolus vulgaris* L.) to *Rhizobium* inoculation and nitrogen fertilization in two Cerrados soils.** Biol Fertil Soils, v. 32, p. 228–233, 2000.

VIDIGAL, S. M. et al. **Nitrogen content, SPAD index and production of single head broccoli.** Horticultura Brasileira, v.39, n.1, p.52-57, 2021. DOI:10.1590/s0102-0536-20210108.

VIDIGAL, S. M. et al. **SPAD index in the diagnosis of nitrogen status in cauliflower as a function of nitrogen fertilization.** Cientifica, v. 46, n. 3, p. 307, 2018. DOI: 10.15361/1984-5529.2018v46n3p307-314.

WALKER, L.; LAGUNAS, B.; GIFFORD, M. L. **Determinants of host range specificity in legume-rhizobia symbiosis.** Frontiers in microbiology, v. 11, p. 585749, 2020.

WEAVER, R. W.; FREDERICK, L. R. **Effect of inoculum rate on competitive nodulation of *Glycine max* L. merrill. I. greenhouse studies.** Agronomy journal, v. 66, n. 2, p. 229–232, 1974. DOI: 10.2134/agronj1974.00021962006600020014x.

WILKER, J. et al. **Agronomic performance and nitrogen fixation of heirloom and conventional dry bean varieties under low-nitrogen field conditions.** *Frontiers in Plant Science*, v.10, p. 327-345, 2019. DOI: 10.3389/fpls.2019.00952.

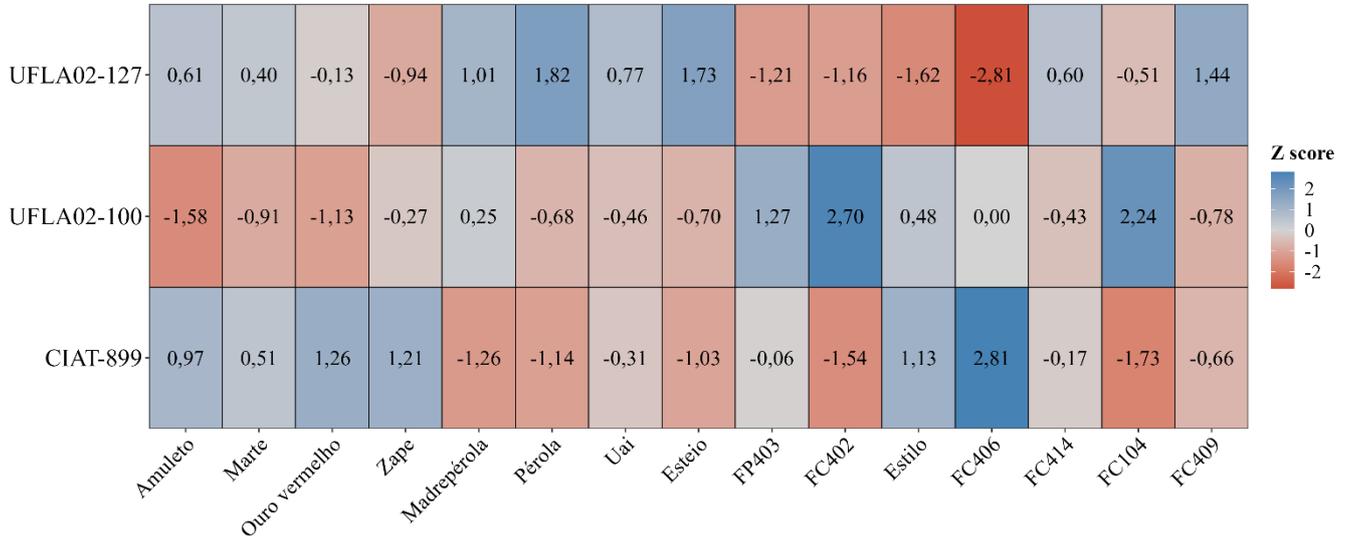
WOLSCHICK, N. H et al. **Cobertura do solo, produção de biomassa e acúmulo de nutrientes por plantas de cobertura.** *Revista de Ciências Agroveterinárias, Lages*, v.15, n.2, p.134-143, 2016.

YAGI, R. et al. **Nodulações e Produtividades de Grãos de Feijoeiros diante da Adubação Nitrogenada ou da Inoculação com *Rhizobium freirei*.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 39, n. 6, p. 1661–1670, 2015. DOI: 10.1590/01000683rbc20140342.

YANG, Q. et al. **Genetic analysis and mapping of QTLs for soybean biological nitrogen fixation traits under varied field conditions.** *Frontiers in Plant Science*, v. 10, p. 1-75, 2019. DOI: 10.3389/fpls.2019.00075.

## APÊNDICE A

Estimativa da Capacidade Específica de Combinação multivariada de cultivares de feijoeiro-comum e estirpes de *Rhizobium*



Fonte: Da autora (2024)

## ARTIGO 2: DISSECANDO O DESENVOLVIMENTO VEGETATIVO EM FEIJOEIRO: ANÁLISE DE IMAGENS NA CONTEXTUALIZAÇÃO DA FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO.

### RESUMO

A realização de avaliações fenotípicas, fisiológicas e nutricionais das plantas é uma etapa fundamental para a identificação de genótipos superiores, e o uso de técnicas de sensoriamento remoto permite maior precisão e rapidez nos processos de avaliação. Objetivou-se avaliar o desenvolvimento vegetativo e a correlação dos índices de vegetação com características biofísicas em cultivares de feijoeiro-comum, inoculadas com diferentes estirpes de *Rhizobium*. O experimento foi conduzido à campo, no município de Lavras, MG. Os tratamentos foram atribuídos no delineamento em blocos casualizados completos (DBCC), em esquema fatorial (7 x 4), constituído de sete cultivares de feijoeiro-comum e quatro fontes de nitrogênio, com quatro repetições. As fontes consistiram na inoculação com as estirpes CIAT 899, UFLA 02-100 e dois controles sem inoculação, sendo, com N mineral (100 kg N ha<sup>-1</sup>), aplicado na semeadura) e sem N mineral. As avaliações ocorreram aos 25, 35, 50, 65 dias após a semeadura (DAS), no florescimento pleno e na colheita. Procedeu-se com a avaliação de altura, largura, índice SPAD, teor de nitrogênio, matéria seca de nódulos, matéria fresca e seca de parte aérea e raiz, número de vagens, peso de cem grãos e produtividade de grãos. Aos 50 DAS, as avaliações incluíram também imagens aéreas, obtidas com um drone Phantom 4 Pro Advanced com sensor RGB (Red, Green, Blue). Os voos foram realizados com sobreposição longitudinal de 80% e lateral de 70%, definido a uma altura de 30 m e deslocamento de 15 m s<sup>-1</sup>, realizado entre 10:00 h e 13:00 h, com dia claro, para minimizar variações influenciadas pela luz natural no espectro solar. A partir das imagens digitais, foram calculados os índices de vegetação GLI, MPRI e VARI, e a cobertura do dossel com a contagem de pixels. Os índices GLI, MPRI e VARI não apresentam correlação significativa com o teor de nitrogênio em plantas de feijoeiro. Contudo, a estimativa da cobertura do dossel de plantas de feijoeiro-comum obtida pela contagem de pixels é eficiente, e apresenta correlação significativa com a produtividade de grãos, evidenciando ser uma opção factível na avaliação do vigor vegetativo desta cultura.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris*. Rizóbios. Índices de vegetação. Produtividade de grãos.

## ARTIGO 2: DISSECTING VEGETATIVE DEVELOPMENT IN COMMON BEAN: IMAGE ANALYSIS IN THE BIOLOGICAL NITROGEN FIXATION CONTEXT

### ABSTRACT

The objective was to assess the vegetative development and the correlation of vegetation indices with biophysical traits in common bean cultivars inoculated with different *Rhizobium* strains. The field experiment was carried out in Lavras, MG. Treatments were assigned in a randomized complete block design (RCBD), in a factorial scheme (7 x 4), with seven common bean cultivars and four nitrogen sources, with four replications. The nitrogen sources included inoculation with the strains CIAT 899, UFLA 02-100, and two controls without inoculation, with mineral N (100 kg N ha<sup>-1</sup>), applied at sowing) and without mineral N. Evaluations were performed at 25, 35, 50, 65 days after sowing (DAS), at full flowering time, and at harvest. Height, width, SPAD index, nitrogen content, nodule dry matter, shoot and root fresh and dry matter, number of pods, hundred-grain weight, and Grain yield were assessed. At 50 DAS evaluations also included aerial images obtained with a Phantom 4 Pro Advanced UAV with RGB sensor (Red, Green, Blue). Flights were conducted with 80% longitudinal and 70% lateral overlap, defined at a height of 30 m and a speed of 15 m s<sup>-1</sup>, performed between 10:00 AM to 1:00 PM. From the digital images, the GLI, MPRI, and VARI vegetation indices, and canopy through pixel counting, were estimated. The GLI, MPRI, and VARI index showed no significant correlation with nitrogen content in common bean. However, the estimation of canopy in common bean obtained by pixel counting is efficient and exhibits a significant correlation with grain yield, proving to be a feasible option in assessing the vegetative vigor of this crop.

Keywords: *Phaseolus vulgaris*. Rhizobia. Vegetation index. Grain yield.

## 1 INTRODUÇÃO

O feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.), é caracterizado pela sua importância socioeconômica e também pelo apreço na sustentabilidade e segurança alimentar (UEBERSAX *et al.*, 2023). É uma cultura de ciclo curto, ponderado à alta exigência nutricional, sendo o nitrogênio, o nutriente mais absorvido. A fixação simbiótica de nitrogênio (FBN) é uma característica intrínseca da família Fabaceae, todavia, predomina-se o conceito de que o feijoeiro-comum tem baixo potencial de fixação de nitrogênio (N) em comparação com outras leguminosas, como a soja, por exemplo. Contudo, muitos estudos evidenciam respostas positivas à inoculação e sugerem que a baixa eficiência desta simbiose pode ser superada por meio de rizóbios altamente eficazes e de genótipos de feijoeiro-comum mais responsivos.

A adubação mineral de N, embora de uso recorrente é facilmente perdida por processos dinâmicos de lixiviação, volatilização e desnitrificação (NYAWADE *et al.*, 2020). Neste sentido, estudos visam a implantação de ferramentas indiretas como medidores de clorofila, medições de refletância e análise de cores com base em imagens, visando altos rendimentos, atrelado a um menor fornecimento de N e, por consonância, minimizando as suas perdas (NASCIMENTO, 2019; RORIE *et al.*, 2011).

Estimativas em escala precisa de nutrientes e rendimento das culturas a partir de imagens de aeronave remotamente pilotada (ARP) podem fornecer um conjunto de dados suficiente para analisar a nutrição vegetal e fornecer subsídio para a modelagem de crescimento e desenvolvimento das culturas e estimativa do rendimento de grãos (CAMPOLO *et al.*, 2022). Características como biomassa, altura das plantas, teor de clorofila e outras variáveis podem ser uma alternativa para gerenciar os recursos disponíveis e reduzir insumos para produção.

A produção de biomassa é uma variável que está diretamente correlacionada com o ganho de produtividade das culturas. No entanto, em muitas culturas agrícolas, a quantificação desta segue o protocolo de amostragem direta e destrutiva, que requer áreas amostrais representativas, é altamente dispendioso e ademais, abrange a subjetividade. Com os recentes avanços tecnológicos, a avaliação remota figura-se como uma alternativa promissora (WANG *et al.*, 2014 ; ZAMAN-ALLAH *et al.*, 2015). Os índices de vegetação (IV) têm sido amplamente utilizados devido à sua capacidade de prever e avaliar características da cobertura vegetal, como a estimativa de área foliar, produção de biomassa e produtividade (LIPOVAC, *et al.*, 2022).

Diante dos numerosos IV disponíveis, os estudos até então realizados na agricultura basearam-se principalmente em 25 índices de vegetação (VIDICAN *et al.*, 2023). São encontrados na literatura diversos relatos acerca da aplicação dos IV em culturas como o trigo,

soja e milho. Na cultura do milho, Lin *et al.* (2023) concluíram que os dados de IV podem ser utilizados para estimar o conteúdo de N nas plantas e avaliar o potencial de poluição por esse nutriente em diferentes estádios de crescimento, em larga escala no campo. Resultados favoráveis são também relatados para a cultura da soja, os quais objetivam principalmente, discriminar a soja de outras culturas (WEI *et al.*, 2022), bem como avaliar o seu vigor e o crescimento (HUANG *et al.*, 2022).

Para a cultura do trigo, os relatos de trabalhos evidenciam que os IV aplicados para essa cultura abrangem aqueles que quantificam a fração da radiação solar absorvida pelas folhas vivas para a atividade de fotossíntese, a fração da cobertura vegetal, a biomassa fresca acima do solo e discriminação de plantas de trigo (VIDICAN *et al.*, 2023).

Contudo, deve-se ressaltar que, embora exista uma ampla base de pesquisas, com resultados precisos e factíveis, a maioria dos estudos disponíveis realizados sobre este tema recrudescem nas culturas do trigo, milho e soja (VIDICAN *et al.*, 2023). São escassos os estudos que utilizaram IV para estimar características biofísicas da cultura do feijoeiro-comum. Assim, estudos envolvendo a avaliação destas características, bem como a utilização de técnicas de sensoriamento remoto, tornam-se importantes na avaliação da cultura e no manejo da sua produção. Ante o exposto, objetivou-se avaliar o desenvolvimento vegetativo e a correlação dos índices de vegetação com características biofísicas em cultivares de feijoeiro-comum, inoculadas com diferentes estirpes de *Rhizobium*.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido à campo de janeiro a março de 2023, na safra da seca, em Lavras, no estado de Minas Gerais (21° 14' 43" S, 44° 59' 59" W), sem irrigação. O clima da região é definido como *Cwa* (mesotérmico), com inverno seco e verão chuvoso, subtropical (DANTAS, CARVALHO; FERREIRA, 2007). A temperatura média e a precipitação total acumulada durante as fases de crescimento do feijoeiro-comum foram de 21,9 °C e 644,4 mm, respectivamente.

Os tratamentos foram atribuídos no delineamento de blocos casualizados completos (DBCC), em esquema fatorial (7 x 4), constituído de sete cultivares de feijoeiro-comum e quatro formas de fornecimento de nitrogênio, com quatro repetições. As formas consistiram na inoculação com as estirpes CIAT 899, UFLA 02-100 e dois controles sem inoculação, com N mineral (100 kg N ha<sup>-1</sup>, aplicado na semeadura, à lanço), e sem N mineral. Foram adotadas as cultivares de feijão do grupo varietal preto e carioca: BRS Esteio, BRS FP403, do grupo preto,

e BRS FC 402, BRS FC 414, Pérola, BRSMG Uai, BRSMG Zape, do grupo carioca, todas com ciclo normal e hábito de crescimento indeterminado.

Os inoculantes contendo as cepas das estirpes utilizadas foram preparados em turfa esterilizada em autoclave na proporção de 1:2 (v:v) de turfa e meio de cultura 79, a 28 °C e agitação constante (110 rpm) por 48 h (SOARES *et al.*, 2006; FERREIRA *et al.*, 2009). A inoculação das sementes foi feita com o inoculante contendo  $10^9$  células  $g^{-1}$ , na dose de 100 g  $kg^{-1}$  de sementes.

Antes da implantação do experimento, procedeu-se com a caracterização química e biológica do solo, na camada de 0 – 20 cm (Tabela 1). A semeadura foi realizada em um latossolo, de textura argilosa, com registros prévios de inoculação de feijoeiro ou de outras espécies leguminosas, adubado com 120 kg  $ha^{-1}$  de  $P_2O_5$  e 350  $K_2O$  kg  $ha^{-1}$ , na forma de superfosfato simples e cloreto de potássio, respectivamente.

Tabela 1. Caracterização química e biológica do solo antes da semeadura.

pH	K	P	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T
	----- mg/dm <sup>3</sup> -----			----- cmol/ dm <sup>3</sup> -----						
5,4	90,70	16,30	7	4,93	0,81	0,10	3,40	5,97	6,07	9,37
V	m	MO	P-rem	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S	
	----- %	----- dag/Kg	mg/L	-----cmol/ dm <sup>3</sup> -----						
63,74	1,65	3,60	28,90	3,70	24,40	13,70	1,05	0,20	18,40	
NMP				-----células g solo----						
				5,52 x 10 <sup>4</sup>						

P- Na - K- Fe - Zn- Mn- Cu- Extrador Mehlich 1

pH em água, KCl e CaCl<sub>2</sub> - Relação 1:2,5; Ca - Mg- Al- Extrator: KCl - 1 mol/L; H + Al- Extrator: SMP; Matéria Orgânica (MO) - Oxidação: Na<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 4N+ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>10N; B- Extrator água quente.

S - Extrator - Fosfato monocálcio em ácido acético

Fonte: Da autora (2024).

A semeadura foi realizada de forma manual, sem nenhum tratamento químico das sementes, na densidade de 12 sementes  $m^{-1}$ . As parcelas foram constituídas por quatro linhas de 5 m de comprimento, espaçadas em 0,60 m, e área útil de 6  $m^2$  (colheita das duas linhas centrais). Realizou-se o manejo agrônomico, conforme a necessidade da cultura, seguindo-se as recomendações técnicas para o feijoeiro-comum na referida região (ARF *et al.*, 2015).

As avaliações ocorreram aos 25 (V4) , 35 (R5) , 50 (R7), 65 (R7/R8) dias após a semeadura (DAS), no florescimento pleno (R5/R6) e na colheita (R9). Avaliou-se o vigor do desenvolvimento vegetativo, considerando a altura (Alt) e a largura da parte aérea (Larg), em cm, índice SPAD (Soil plant analysis development), aferido no terço médio das plantas, com amostragem repetida de três plantas por parcela. A altura das plantas foi obtida com uma régua,

considerando do coleto até o meristema apical. Para a largura considerou a extremidade de uma folha no ramo à sua oposta em outro ramo.

No florescimento pleno foi avaliado a matéria seca de nódulos (MSN), matéria fresca e seca radicular (MFR, MSR), matéria fresca e seca da parte aérea (MFPA e MSPA), em gramas e teor de nitrogênio (%), adotando-se também três plantas por parcela. A MSPA foi obtida em estufa a 65 °C, por 72h, e o teor de nitrogênio nas folhas pelo método de Kjeldahl, com a amostragem de todas as folhas (JONES JR, 1987; MORRIES, 1983). Na colheita, procedeu-se com avaliações do número de vagem por plantas (NV), peso de cem grãos (PCG), considerando-se três plantas competitivas por parcela, em g. Foi estimada a produtividade de grãos pela colheita das duas linhas centrais, corrigida para 13% de umidade, apresentada em kg ha<sup>-1</sup>.

Aos 50 DAS, as avaliações incluíram também imagens aéreas, obtidas com um drone Phantom 4 Pro Advanced com sensor RGB (Red, Green, Blue). O sensor capta comprimentos de onda nas faixas de azul (B), que varia de 440 a 495 nm, verde (G), com variação entre 495 e 570 nm, e vermelho (R), cujos comprimentos de onda variam de 620 a 750 nm. Para a realização dos voos, foram distribuídos sete pontos de controle, para o georreferenciamento com um receptor de GPS RTK (Global Positioning System - Real Time Kinematics) e processamento das imagens aéreas. As coordenadas E, N e Z de cada ponto estão no sistema de projeção UTM no fuso 23, hemisfério Sul e referenciado pelo SIRGAS200.

Os planos de voos foram elaborados com o Pix4D (versão 4.9.0, Pix4d SA, Prilly, Suíça). A execução do aerolevanteamento fez uma sobreposição longitudinal de 80% e lateral de 70%, definido a uma altura de 30 m e deslocamento de 15 m s<sup>-1</sup>, com a câmera posicionada perpendicularmente à direção de movimento do ARP. O voo foi realizado entre 10:00 h e 13:00 h, com dia claro, para minimizar variações influenciadas pela luz natural no espectro solar.

O ortomosaico foi obtido utilizando-se o software PIX4D. O fluxo de trabalho de processamento incluiu: alinhamento de imagem, construção de uma nuvem de pontos densa, construção de malha, construção do modelo de superfície digital e construção dos ortomosaicos. A análise das ortofotos foi realizada utilizando o software QGIS (QGIS Development Team, 2023). Inicialmente procedeu-se com o corte da ortomosaico refere da área referente aos experimentos. Com o auxílio do plugin LFTools (FRANÇA, 2021) foi realizada a segmentação do solo presente nas ortofotos, tendo a informação de cobertura vegetal e em seguida realizada a delimitação das parcelas e a aplicação de um *Buffer* negativo de 0,6 metros, de modo a isolar a área útil das parcelas para a extração de dados.

Foram derivados os índices de vegetação de banda visível (RGB):

- i. Visible atmospherically resistant index (VARI) (GITELSON *et al.*, 2002).

$$VARI = \frac{(Green-Red)}{(Green+Red-Blue)} \quad (1)$$

- ii. Green leaf index (GLI) (LOUHAICHI; BORMAN; JOHNSON, 2001).

$$GLI = \frac{(Green-Red)+(Green-Blue)}{(2*Green)+(Red+Blue)} \quad (2)$$

- iii. Modified photochemical reflectance index (MPRI) (YANG *et al.*, 2008).

$$MPRI = \frac{(Green-Red)}{(Green+Red)} \quad (3)$$

Calculou-se a cobertura do dossel, adotando-se cobertura vegetal do índice GLI como referência, realizando a contagem dos pixels dentro da área útil da parcela, o que foi considerado como cobertura vegetal.

Os dados foram verificados quanto à normalidade e homogeneidade de variância e submetidos à análise de variância pelo teste F ( $p < 0,05$ ), conforme o modelo estatístico abaixo:

$$y_{ijk} = \mu + p_i + t_j + b_k + pt_{ij} + e_{ijk} \quad (4)$$

Em que:

$y_{ijk}$ : Valor observado referente à parcela que recebeu a cultivar  $i$ , a fonte de nitrogênio  $j$ , no bloco  $k$ .

$\mu$ : Constante associada a todas as observações.

$p_i$ : Efeito fixo da cultivar  $i$ .

$t_j$ : Efeito fixo da fonte de nitrogênio  $j$ .

$b_k$ : Efeito do bloco  $k$ .

$pt_{ij}$ : Efeito da interação entre cultivar  $i$  e fonte de nitrogênio  $j$ .

$e_{ijk}$ : Erro experimental aleatório associado à observação  $y_{ijk}$

A precisão experimental de cada variável foi aferida pelo coeficiente de variação, conforme a expressão abaixo:

$$CV = \left( \frac{\sqrt{QME}}{\bar{X}} \right) * 100 \quad (5)$$

Em que:

*QME*: Quadrado médio do erro.

$\bar{X}$ : Média amostral.

Para verificar a eficiência da estimativa da cobertura vegetal estimada pela fenotipagem de alto rendimento, foi estimada a correlação de Pearson entre as medições manuais e a cobertura do dossel estimada com base na contagem de pixels. Com significância para o vigor do desenvolvimento vegetativo, os dados das médias ajustadas das variáveis altura, largura e índice SPAD foram submetidos à análise de regressão polinomial de ordem dois:

$$y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 x_{ij} + \beta_2 x_{ij}^2 + e_{ij} \quad (6)$$

$y_{ij}$ : Variável resposta para a cultivar *i* na DAS *j*;

$x_i$ : Efeito da variável independente, *x*, na observação *i*,  $i = 1, \dots, n$  (não aleatória);

$\beta_0; \beta_1; \beta_2$ : Correspondem aos parâmetros do modelo;

$e_{ij}$ : Erro aleatório associado ao modelo;

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Desenvolvimento vegetativo de cultivares de feijão com *Rhizobium*

O coeficiente de variação é a estimativa do desvio do erro em função da média e está intrinsecamente atrelado a qualidade experimental. Neste estudo, os CVs variam de baixo a médio para a maioria das características (Tabela 2). Apenas para a variável área de cobertura vegetal este foi considerado alto. Deve-se destacar, contudo, que a avaliação dessa característica foi o produto entre a largura e altura da planta, ou seja, ao multiplicar ou dividir duas medidas, os erros relativos associados a cada uma dessas medidas também se propagam, em que o erro relativo total pode ser maior do que os erros individuais destas (KOGLER, 2008).

Tabela 2 – Resumo da análise de variância para altura, largura, área de cobertura vegetal e índice SPAD em cultivares de feijoeiro-comum inoculado com estirpes de *Rhizobium* em diferentes estádios vegetativos.

FV	GL	Alt	Larg	Área	SPAD	Alt	Larg	Área	SPAD	Alt	Larg	Área	SPAD	Alt	Larg	Área	SPAD
		25 DAS				35 DAS				50 DAS				65 DAS			
Cultivar (C)	6	0,000*	0,003*	0,000*	0,019*	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*	0,0437*	0,138 <sup>ns</sup>	0,119 <sup>ns</sup>	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*
Fontes de N (FN)	3	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*	0,488 <sup>ns</sup>	0,272 <sup>ns</sup>	0,000*	0,002*	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*
Estirpe (E)	1	0,200 <sup>ns</sup>	0,026*	0,078 <sup>ns</sup>	0,023*	0,312 <sup>ns</sup>	0,442 <sup>ns</sup>	0,359 <sup>ns</sup>	0,379 <sup>ns</sup>	0,952 <sup>ns</sup>	0,000*	0,002*	0,000*	0,565 <sup>ns</sup>	0,000*	0,001*	0,001*
E vs CN	1	0,005*	0,000*	0,000*	0,049*	0,005*	0,005*	0,000*	0,737 <sup>ns</sup>	0,811 <sup>ns</sup>	0,000*	0,041*	0,445 <sup>ns</sup>	0,004*	0,002*	0,000*	0,020*
E vs SN	1	0,000*	0,050*	0,251 <sup>ns</sup>	0,000*	0,541 <sup>ns</sup>	0,039*	0,813 <sup>ns</sup>	0,182 <sup>ns</sup>	0,062 <sup>ns</sup>	0,002*	0,452 <sup>ns</sup>	0,008*	0,035*	0,000*	0,000*	0,011*
C x FN	18	0,690 <sup>ns</sup>	0,250 <sup>ns</sup>	0,303 <sup>ns</sup>	0,800*	0,684 <sup>ns</sup>	0,649 <sup>ns</sup>	0,856 <sup>ns</sup>	0,808 <sup>ns</sup>	0,057 <sup>ns</sup>	0,501 <sup>ns</sup>	0,084 <sup>ns</sup>	0,950 <sup>ns</sup>	0,119 <sup>ns</sup>	0,008*	0,112 <sup>ns</sup>	0,257 <sup>ns</sup>
CV(%)		15,77	12,17	24,25	9,32	21,88	11,64	29,53	6,99	15,98	13,76	24,77	7,13	11,70	11,44	18,36	9,05

\* Significativo pelo teste F (p< 0,05)

<sup>ns</sup> Não significativo

CN: Com nitrogênio; Sem N: Sem nitrogênio; DAS: Dias após a semeadura; Alt: Altura; Larg: Largura; Área: Larg x Alt; SPAD: Índice SPAD.

Fonte: Da autora (2024).

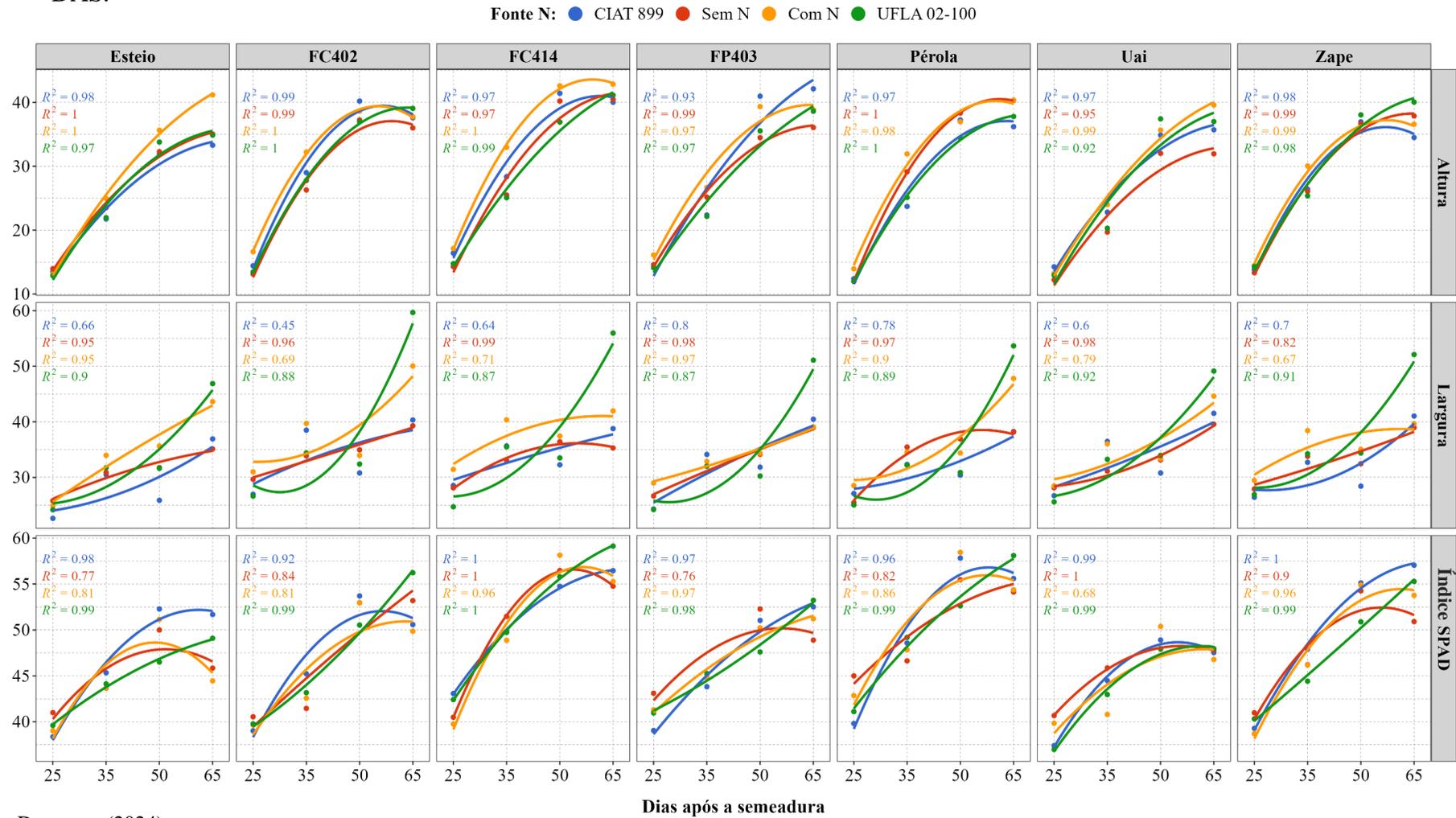
A altura não variou em função das estirpes, no entanto, as fontes de N influenciaram no crescimento das plantas (Tabela 2). Logo, conclui-se que a variação é decorrente dos tratamentos com a adubação nitrogenada. Aos 50 DAS, observou-se que há diferença significativa na altura resulta devido as cultivares. No estágio de florescimento (R5/R6), um incremento no número de flores e conseqüente, de vagens, aumenta a distribuição de fotoassimilados para as essas estruturas em detrimento da fração vegetativa, ou seja, ocorre uma redução na taxa de crescimento das plantas (TAIZ *et al.*, 2017). Por seu turno, aos 65 DAS, as fontes de N voltam a influenciar nesta característica. Em cultivares de crescimento indeterminado, após o florescimento, estas continuam a crescer lentamente.

O vigor do desenvolvimento vegetativo segue um modelo quadrático, conforme o estágio fenológico de avaliação (Figura 1). Para as cultivares BRS Esteio, BRS FC414 e BRSMG Uai, a adubação nitrogenada promove maiores incrementos na altura. Aos 65 DAS, as cultivares BRSMG Zape e BRS FP403 foram mais responsivas à inoculação e apresentaram maior crescimento vegetativo. A cultivar BRSMG Uai figura-se como sensível à falta do nitrogênio, sendo considerado um genótipo com alto potencial produtivo (2361 kg ha<sup>-1</sup>) e conseqüentemente, exigente em fertilidade (EMBRAPA, 2018). Para a maioria das cultivares, observou-se um decréscimo na curva de crescimento, relacionado ao acamamento das mesmas. Para as cultivares BRS Esteio, BRS FP403 e BRSMG Uai, caracterizadas como tolerantes ao acamamento, este fato não foi observado.

A emissão de ramos laterais e conseqüentemente a largura do dossel está intrinsecamente relacionada ao rendimento de grãos no feijoeiro-comum. O maior crescimento dos ramos resulta em aumento de área foliar, maior interceptação de luz e, conseqüentemente, em maior produtividade de matéria seca e de grãos. Todavia, essa é uma característica dependente do genótipo e da sua interação com o ambiente, justificando as diferenças significativas em todos os estádios avaliados, em função das fontes de N e da cultivar (WUBE; SHARMA, 2020). Apenas aos 35 DAS não se obteve diferença na largura do dossel em função das estirpes (Tabela 2).

Para todas as cultivares, a estirpe UFLA 02-100 promove os maiores incrementos para essa características aos 65 DAS, com média fenotípica de 34,5 cm (Figura 1). Em outros estudos, esta estirpe caracteriza-se por promover a produção de MSPA equivalente a adubação mineral e rendimento de grãos similar. Logo, apresenta potencial para ser recomendada como inoculante para o feijoeiro-comum (NOGUEIRA *et al.*, 2020).

Figura 1 – Altura (cm), largura (cm) e índice SPAD de cultivares de feijoeiro-comum inoculado com estirpes de *Rhizobium* aos 25, 35, 50 e 65 DAS.



Fonte: Da autora (2024).

Após o florescimento, em função da queda na atividade da nitrogenase e senescência dos nódulos ocorre um decréscimo na FBN. Contudo, observa-se diferença significativa entre as estirpes e as cultivares para o índice SPAD, um indicativo de melhor eficiência na interação estirpe-cultivar na manutenção da viabilidade do nódulo. Para o contraste E vs CN observou-se que não ocorre diferença significativa para o índice SPAD, sugerindo respostas similares entre a adubação nitrogenada e a inoculação com *Rhizobium* (Tabela 2).

Os maiores índices SPAD foram obtidos com a inoculação com *Rhizobium* com as cultivares BRS FC402 e BRS FC414 aos 65 DAS. Observou-se um comportamento distinto para o índice SPAD em resposta a inoculação com a UFLA 02-100. Para todas as demais fontes de N, aos 50 DAS houve uma tendência de redução desta característica, contudo, para esta estirpe, o índice permaneceu crescente (Figura 1). Tal fato sugere a estabilidade e eficiência da estirpe conforme o desenvolvimento da cultura, contra-argumentando estudos que afirmam menor eficiência da FBN após o florescimento (ANDRAUS *et al.*, 2016). Em função da cultivar, o início da senescência dos nódulos no feijoeiro ocorre por volta de 35 e 40 DAS com senescência total após 65-70 DAS (FERNÁNDEZ-LUQUEÑO *et al.*, 2008; LUQUEÑO *et al.*, 2008). Quando as vagens e sementes estão em desenvolvimento, elas mobilizam grande parte do carbono assimilado em detrimento dos nódulos, levando à supressão do crescimento e, subsequentemente, à morte dos nódulos e à cessação da FBN (SILVA *et al.*, 2019).

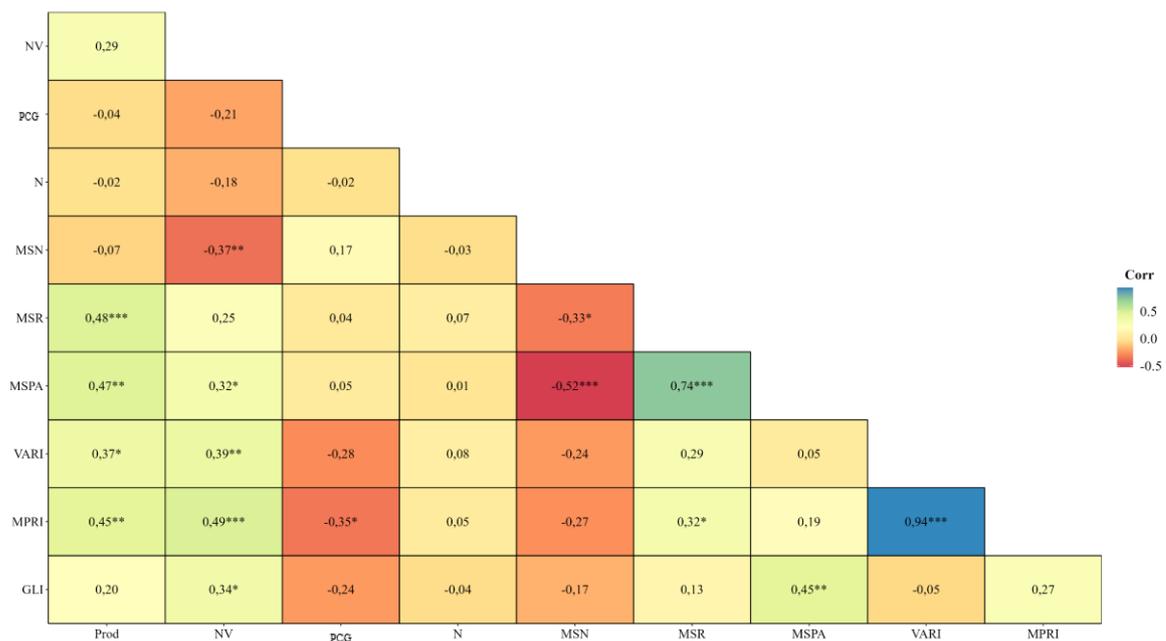
Cultivares como BRS Estilo e Pérola, atingem o número máximo de nódulos ativos (60%) durante os estádios de desenvolvimento V4 a R5, começando a decrescer no estádio R6 e R7 (ANDRAUS; CARDOSO; FERREIRA, 2016). Neste estudo, observou-se o decréscimo no índice SPAD com a inoculação com a CIAT 899 aos 50 DAS, corroborando com as evidências apresentadas por esses autores (Figura 1).

A senescência dos nódulos envolve uma série de processos bioquímicos, relacionados tanto a bactéria com a leguminosa. Um atraso na senescência do nódulo pode aumentar a contribuição da FBN para o crescimento e rendimento das plantas (GRAHAM, 1981; LÓPEZ *et al.*, 2018). Neste estudo, apresentou-se a hipótese que a estirpe UFLA 02-100 permanece ativa à simbiose mesmo após o florescimento. Contudo, deve-se enfatizar que apenas esta variável não é o suficiente para que conclusões sólidas sejam assertivas. A avaliação da nodulação deveria ser realizada em todos os estádios em estudo, aferindo a viabilidade, número e tamanho dos nódulos, o que não foi realizada neste estudo. Portanto, estudos mais detalhados são necessários para melhor esclarecer o envolvimento desta estirpe e a senescência do nódulo.

### 3.2 Estimativa da produção de feijoeiro-comum por meio de índices de vegetação

Na cultura do feijão, a produtividade de grãos é altamente correlacionada com os componentes da produção: número de vagens por planta, número de grãos por planta e massa de grãos (DRUN *et al.*, 2017). No entanto, neste estudo o NV e PCG não apresentaram correlações significativa com a produtividade (Figura 2).

Figura 2- Matriz de correlação entre componentes de produção, componentes vegetativos e índices de vegetação na produtividade do feijoeiro-comum.



\*, \*\*, \*\*\*Significativo ao nível de 0,10, 0,05, 0,01 respectivamente, pelo teste t.

Prod: Produtividade; NV: Número de vagens; PCG: Peso de cem grãos; N: Teor de nitrogênio; MSN: Matéria seca de nódulos; MSR: Matéria seca radicular; MSPA: Matéria seca da parte aérea; VARI: Visible atmospherically resistant index; MPRI: Modified photochemical reflectance index; GLI: Green leaf index.

Fonte: Da autora (2024).

Uma possível explicação para este fato pode estar associada à falta de variabilidade nos caracteres. Outro ponto que merece destaque é que existe uma compensação entre os componentes de produção. Isto é, a redução de um implica no aumento de outro (DALCHIAVON; CARVALHO, 2012). A correlação de um caráter pode assumir um valor positivo, negativo ou igual a zero. Porém, Cruz e Regazzi (1994) relatam que a quantificação e a interpretação da magnitude de uma correlação podem resultar em equívocos na estratégia de seleção, pois correlação elevada pode ser resultado do efeito, sobre estes, de um terceiro ou de um grupo de caracteres.

Neste contexto, a análise de trilha é um dos métodos para entender as causas envolvidas nas associações entre caracteres e decompor a correlação existente em efeitos diretos e indiretos, através de uma variável principal como o rendimento de grãos e as variáveis explicativas, ou seja, os componentes do rendimento. Contudo, no presente estudo esta estratégia não foi utilizada.

Por outro lado, a MSPA e MSR apresentam correlação positiva significativa com a produtividade de grãos de feijão (Figura 2). Plantas vegetativamente vigorosas são plantas com maior potencial produtivo. O máximo rendimento de uma cultura é determinado pela capacidade de as plantas interceptarem radiação solar e converterem esta radiação em MS pelo processo fotossintético (ZANON *et al.*, 2015).

Nas últimas décadas, muitos índices espectrais foram propostos para estimar os parâmetros do status do nitrogênio em culturas como trigo, milho e arroz (LI *et al.*, 2014; XU *et al.*, 2023). Contudo, neste estudo, nenhum dos índices avaliados apresentaram correlação positiva com o teor de N. Segundo Rori *et al.* (2011), a cor da planta tem potencial para indicar com precisão o status de N do milho e de outras culturas, desde que não sejam leguminosas, e os métodos corretos sejam aplicados. Poucos são os trabalhos que abordam a correlação dos índices de vegetação e o status do N na cultura do feijoeiro. Em vista disto, são necessários estudos que indiquem os melhores índices e os estádios fenológicos de avaliação que apresentam a maior acurácia na estimativa dos atributos agronômicos desta cultura, garantindo a aplicação do sensoriamento remoto com maior precisão.

Saravia *et al.* (2023), estimando a produtividade de quatro cultivares de feijoeiro-comum aplicando índices de vegetação baseados em imagens multiespectrais de ARP, concluíram que os modelos foram mais eficientes nos estádios fenológicos V3–V4 e R6–R8 para todas as cultivares de feijão. Mamani *et al.* (2022) verificaram também uma correlação altamente significativa da altura das plantas de feijoeiro-comum com oito índices de vegetação derivados de imagens de ARP.

O índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) é comumente aplicado para o diagnóstico da disponibilidade de N (RORIE *et al.*, 2020). Com o propósito de validar o uso do MPRI como indicador vegetativo, Linhares, Rocha e Amaral (2013) avaliaram a correlação existente entre os índices NDVI e MPRI. Segundo os autores, os resultados evidenciaram que o NDVI e MPRI apresentam um alto nível de correlação, estando acima de 80% em todas as imagens usadas no experimento. Neste estudo, embora tenha apresentado uma correlação positiva com N, esta não foi significativa.

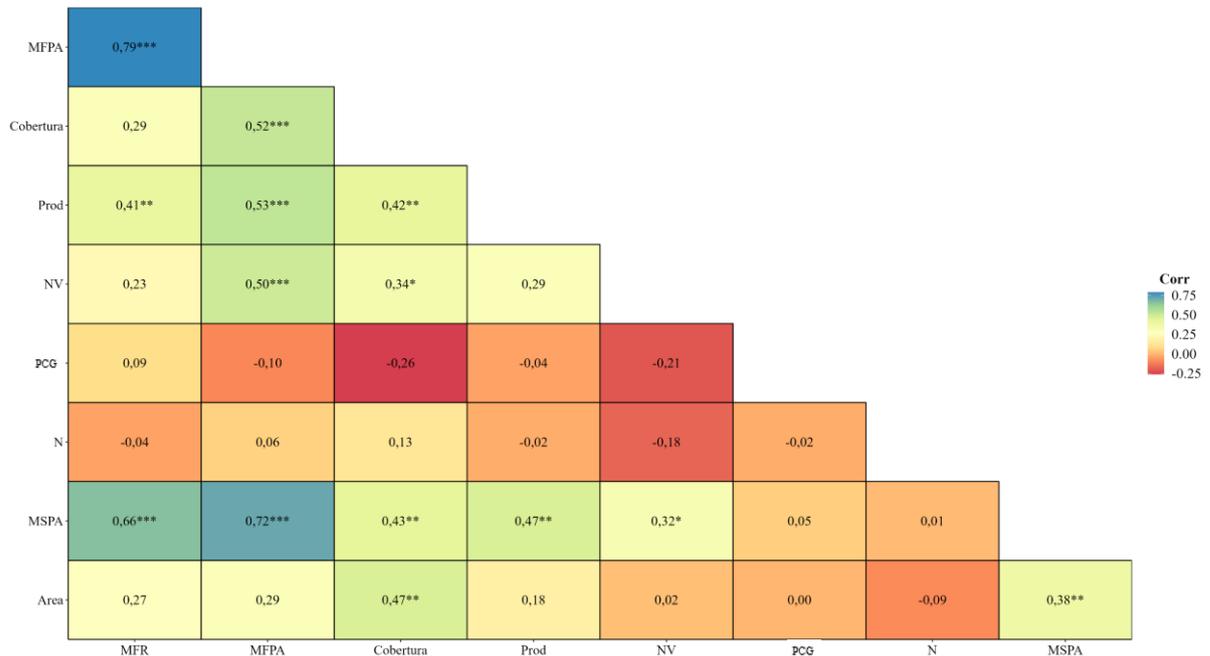
Os índices MPRI e VARI apresentam correlação positiva com a produtividade do feijoeiro-comum. O índice VARI é aplicado para inferir a fração de vegetação com a mínima interferência de fatores atmosféricos e tem íntima relação para a inferência de produtividade. Na cultura do milho, trabalhos evidenciam o potencial deste índice na estimativa de rendimento de grãos (MARTÍNEZ *et al.*, 2020).

Para o NV e MSPA, o índice GLI apresentou correlação positiva significativa. Este índice é um indicador de clorofila criado para classificar os níveis de senescência das plantas, refletindo na distinção entre vegetação fotossinteticamente ativa e vegetação seca com exposição de solo (ANDRADE *et al.*, 2019), apresentando correspondência com a produtividade. Neste estudo, como a correlação entre o NV e Prod foi não significativa, justifica-se a não significância deste índice para o rendimento de grãos do feijoeiro.

A capacidade do dossel das plantas cobrirem a superfície do solo pode ser considerada sob duas óticas: a ambiental e a agronômica. A agronômica, revela o vigor vegetativo, o potencial competitivo da cultura, a capacidade fotossintética e produtiva. Existem diferentes métodos para a estimativa da cobertura vegetal, entre estes, o método manual e a medição da fração de pixels verdes em comparação ao número total de pixels em uma imagem. Neste estudo, a contagem de pixels revelou maior eficiência em comparação ao método manual, evidenciada pela alta acurácia e correlação significativa com a produtividade de grãos e a biomassa (Figura 3).

A cobertura do dossel estimada com base na contagem de pixels teve correlação positiva significativa com a área obtida manualmente, evidenciando o potencial deste método. A implementação da tecnologia de ARP para a estimativa indireta da cobertura do dossel constitui uma abordagem eficaz, aportando menor intervenção manual (SCHIRRMANN *et al.*, 2016). Embora muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos acerca da otimização dos processos produtivos a partir do sensoriamento remoto, a cultura do feijoeiro-comum não é foco destes, fazendo-se necessário o investimento tecnológico nesta cultura. Estimar a produtividade de grãos com imagens multiespectrais pode auxiliar no sistema de produção desta cultura.

Figura 3 - Matriz de correlação da cobertura do dossel obtida manualmente e pela contagem de pixels e componentes vegetativo e produtivo do feijoeiro-comum.



\*, \*\*, \*\*\*\* Significativo ao nível de 0,10, 0,05, 0,01, respectivamente, pelo teste t.

MFR: Matéria fresca radicular; MFPA: Matéria fresca da parte aérea; Cobertura: Cobertura do dossel obtida pela contagem de pixels; Prod: Produtividade; NV: Número de vagens; PCG: Peso de cem grãos; N: Teor de nitrogênio; MSPA: Matéria seca da parte aérea; Área: Área de cobertura vegetal.

Fonte: Da autora (2024).

## CONCLUSÕES

Aos 65 DAS, as cultivares BRSMG Zape e BRS FP403 foram mais responsivas a inoculação e apresentaram maior crescimento vegetativo.

Os índices GLI, MPRI e VARI não apresentam correlação significativa com o teor de nitrogênio em plantas de feijoeiro.

A estimativa da cobertura do dossel de plantas de feijoeiro-comum obtida pela contagem de pixels foi eficiente, e apresenta correlação significativa com a produtividade, evidenciando ser uma opção factível para avaliação do vigor vegetativo.

## REFERÊNCIAS

AGISOFT METASHAPE PROFESSIONAL. Versão 1.8.5. Agisoft LLC: St. Petersburg, Rússia, 2022.

ANDRADE, R. G. et al. **Uso de veículo aéreo não tripulado (vant) no monitoramento dos estádios de desenvolvimento da cultura do milho**, 2019. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/209340/1/Cap-21-Ebook-EngSanitAmb-Ricardo.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2024.

ANDRAUS, M. P.; CARDOSO, A. A.; FERREIRA, E. P. B. **Differences in nodulation and grain yield on common bean cultivars with different growth cycles**. Communications in Soil Science and Plant Analysis, v. 47, n. 9, p. 1148-1161, 2016.

ARF, O; LEMOS, L.B.; SORATTO, R.P.; FERRARI, S. (Ed.). **Aspectos gerais da cultura do feijão: *Phaseolus vulgaris* L.** Botucatu: UNESP/FEPAP, 2015. 443 p.

CAMPOLO, J. et al. **Evaluating maize yield response to fertilizer and soil in Mexico using ground and satellite approaches**. Field crops research, v. 276, n. 108393, p. 108393, 2022. DOI: 10.1016/j.fcr.2021.108393

CRUZ, C.D. e REGAZZI, A.J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa: UFV, 1994. 390p.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. DE P. E. **Correlação linear e espacial dos componentes de produção e produtividade da soja**. Ciências agrárias, v. 33, n. 2, p. 541–552, 2012. DOI: 10.5433/1679-0359.2012v33n2p541

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G. de; FERREIRA, E. **Classificação e tendências climáticas em Lavras, MG**. Ciência e Agrotecnologia, [S.L.], v. 31, n. 6, p. 1862-1866, dez. 2007. DOI: 10.1590/s1413-70542007000600039.

DRUN, R.P. et al. **Parâmetros produtivos do feijão vermelho em função do tamanho de sementes**. Colloquium Agrariae, v. 13, n. 3, p. 41–48, 2017. DOI: 10.5747/ca.2017.v13.n3.a172

**EMBRAPA. BRSMG Uai: cultivar de feijão tipo carioca com planta de arquitetura ereta. - Portal Embrapa, 2018**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1103800/brsmg-uai-cultivar-de-feijao-tipo-carioca-com-planta-de-arquitetura-ereta>>. Acesso em: 23 jan. 2024.

FERNÁNDEZ-LUQUEÑO, F. et al. **Micro-morphology of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) nodules undergoing senescence**. Acta Physiologiae Plantarum, v. 30, n. 4, p. 545-552, 2008.

FERREIRA, P.A.A et al. **Inoculação com cepas de rizóbio na cultura do feijoeiro**. Ciência Rural, v.39, n.7, p.2210-2212, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/MpYbyqVsTVs4QGhwFDnsXTd/?format=pdf>. Acesso em: 12 jan. 2024.

FRANÇA, L. **Tools for cartographic production, surveying, database management, digital image processing and spatial analysis**. 2021. Disponível em: <https://plugins.qgis.org/plugins/lftools/>.

GITELSON, A. A et al. **Vegetation and soil lines in visible spectral space: a concept and technique for remote estimation of vegetation fraction**. International Journal Of Remote Sensing, v. 23, n. 13, p. 2537-2562, jan. 2002.

GRAHAM. P. H. **Some Problems of Nodulation and Symbiotic Nitrogen Fixation in *Phaseolus vulgaris* L.: A Review**. Field Crops Research, v. 4, p. 93-112, 1981.

HUANG, Y. et al. **Automated soybean mapping based on canopy water content and chlorophyll content using Sentinel-2 images**. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 109, n. 102801, p. 102801, 2022. DOI: 10.1016/j.jag.2022.102801.

JONES JR, J.B. **Kjeldahl nitrogen determination-What's in a name**. Journal of Plant Nutrition, v.10, p.1675-1682, 1987.

KOGLER, J. **Propagação de erros**, 2008. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/718049/mod\\_resource/content/1/Propagac%CC%A7a%CC%83o%20de%20Erros%20-%20JK%202009.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/718049/mod_resource/content/1/Propagac%CC%A7a%CC%83o%20de%20Erros%20-%20JK%202009.pdf)>. Acesso em: 21 jan. 2024.

LI, F. et al. **Improving estimation of summer maize nitrogen status with red edge-based spectral vegetation indices**. Field crops research, v. 157, p. 111–123, 2014. DOI: 10.1016/j.fcr.2013.12.018

LIN, R. et al. **Diagnosing Nitrogen Content in Maize Canopy in Hetao Irrigation District Using Multi-source Remote Sensing Data**. Journal of Irrigation and Drainage, v. 42, n. 6, p.66 -72, 2023. DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2022349

LINHARES, M. M. A.; ROCHA, N. C. C.; AMARAL, B. A. S. **Análise do índice MPRI como indicador vegetativo através da correlação do mesmo com o índice NDVI**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16. (SBSR), 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 8254- 8260, 2013.

LIPOVAC, A. et al. **Correlation between ground measurements and UAV sensed vegetation indices for yield prediction of common bean grown under different irrigation treatments and sowing periods**. Water, v. 14, n. 22, p. 1-23, 2022. DOI: 10.3390/w14223786

LÓPEZ, S. M. Y. et al. **Nodulation and delayed nodule senescence: Strategies of two *Bradyrhizobium japonicum* isolates with high capacity to fix nitrogen**. Current microbiology, v. 75, n. 8, p. 997–1005, 2018. DOI: 10.1007/s00284-018-1478-0

LOUHAICHI, M.; BORMAN, M. M.; JOHNSON, D. E. **Spatially Located Platform and Aerial Photography for Documentation of Grazing Impacts on Wheat**. Geocarto International, v. 16, n. 1, p. 65-70, mar. 2001. DOI:10.1080/10106040108542184

LUQUENÑO et al. **Nodule senescence and biomass components in common bean cultivars.** Revista Fitotecnia Mexicana, v. 31, n. 3, p. 195-201, 2008.

MAMANI, Q. J. et al. **Arbizu, CI Avaliação de índices de vegetação derivados de imagens de UAV para previsão de variáveis biométricas em feijão durante o estágio de maturação.** Idésia, v. 40, p. 39–45, 2022. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8867692>. Acesso em: 19 Jan. 2024.

MARTÍNEZ G. H. *et al.* **Estimation of the vegetation coverage fraction in corn (*Zea mays*) through digital images taken by an unmanned aerial vehicle (uav).** Revista Fitotecnia Mexicana, v. 43, n. 4, p. 399 – 409, 2020, Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85098786377&partnerID=40&md5=db2c50ce6da7882dcd37bba6c3b66e8c>. Acesso em: 21 Jan. 2024

MORRIES, P. **A century of Kjeldahl (1883-1983).** Journal of the Association of Public Analysts, v.21, p.53-58, 1983.

NASCIMENTO, G. H. **Medidores portáteis de clorofila na estimativa da adubação nitrogenada em cobertura no feijoeiro.** Lavras: Universidade Federal de Minas, 2019. Disponível em: [http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/37158/2/DISSERTA%20c3%87%20c3%83O\\_Medidores%20port%20c3%a1teis%20de%20clorofila%20na%20estimativa%20da%20aduba%20c3%a7%20c3%a3o%20nitrogenada%20em%20cobertura%20no%20feijoeiro.pdf](http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/37158/2/DISSERTA%20c3%87%20c3%83O_Medidores%20port%20c3%a1teis%20de%20clorofila%20na%20estimativa%20da%20aduba%20c3%a7%20c3%a3o%20nitrogenada%20em%20cobertura%20no%20feijoeiro.pdf). Acesso em: 08 Jan. 2024

NOGUEIRA, C. DE O. G. et al. **Agronomic efficiency of *Rhizobium* strains from the Amazon region in common bean.** Acta amazonica, v. 47, n. 3, p. 273–276, 2017. DOI: 10.1590/1809-4392201603422

NYAWADE, S. O. et al. **Optimizing soil nitrogen balance in a potato cropping system through legume intercropping.** Nutrient Cycling in Agroecosystems, v. 117, n. 1, p. 43–59, 2020. DOI: 10.1007/s10705-020-10054-0

Pix4D. Versão 4.9.0. **Pix4D SA:** Lausanne, Suíça, 2022.

QGIS Development Team. **QGIS Geographic Information System.** Open-Source Geospatial Foundation Project, 2023. <http://qgis.osgeo.org>.

RORIE, R. L. et al. **The assessment of leaf nitrogen in corn from digital images.** Crop Science, v. 51, n. 5, p. 2174–2180, 2011. Disponível em: [https://www.specmeters.com/assets/1/7/Leaf\\_N\\_in\\_Corn\\_%28Rorie\\_et\\_al,\\_Oct\\_2011%29.pdf](https://www.specmeters.com/assets/1/7/Leaf_N_in_Corn_%28Rorie_et_al,_Oct_2011%29.pdf). Acesso em: 20 Jan. 2023.

RORIE, R. L. et al. **The assessment of leaf nitrogen in corn from digital images.** Crop Science, v. 51, n. 5, p. 2174–2180, 2011. DOI: 10.2135/cropsci2010.12.0699

SARAVIA, D. et al. **Yield prediction of four bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivars using vegetation indices based on multispectral images from UAV in an arid zone of Peru.** Drones, v. 7, n. 5, p. 2-18, 2023. DOI: 10.3390/drones7050325

SCHIRRMANN, M et al. **Estimating wheat biomass by combining image clustering with crop height**. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 121, p. 374-384, 2016. DOI: 10.1016/j.compag.2016.01.007

SILVA, H. A. P et al. **Molecular and biochemical changes of aging-induced nodules senescence in common bean**. *Symbiosis*, v. 79, n. 1, p. 33-48, 2019.

SOARES, A. L. DE L. et al. **Eficiência agrônômica de rizóbios selecionados e diversidade de populações nativas nodulíferas em Perdões (MG): II - feijoeiro**. *Revista brasileira de Ciência do Solo*, v. 30, n. 5, p. 803–811, 2006. DOI: 10.1590/S0100-06832006000500006.

TAIZ et al. **Fisiologia Vegetal**. 6 Ed, Artmed, Porto Alegre, 2017, 848 p.

UEBERSAX, M. A. et al. **Dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.) as a vital component of sustainable agriculture and food security—A review**. *Legume Science*, v. 5, n. 1, p. 1-13, 2023; DOI: 10.1002/leg3.155

VIDICAN, R. et al. **Using remote sensing vegetation indices for the discrimination and monitoring of agricultural crops: A critical review**. *Agronomy (Basel, Switzerland)*, v. 13, n. 12, p. 3040, 2023. DOI: 2073-4395/13/12/3040

WANG, L. et al. **Predicting grain yield and protein content in wheat by fusing multi-sensor and multi-temporal remote-sensing images**. *Field Crops Research*, v. 164, p. 178–188, 2014. DOI: 10.1016/j.fcr.2014.05.001

WEI, M. et al. **Investigating the potential of sentinel-2 MSI in early crop identification in Northeast China**. *Remote Sensing*, v. 14, n. 8, p. 1928, 2022.:DOI: 10.3390/rs14081928

WUBE, T.; GIRMA, A.; SHARMA, P. D. **Response of haricot bean(*Phaseolus vulgaris* L.) to irrigation frequency and intra row spacing at Arba Minch, Ethiopia**. *Agricultural Sciences*, v. 11, n. 06, p. 540–551, 2020. DOI: 10.4236/as.2020.116034

XU, S. et al. **Monitoring leaf nitrogen content in rice based on information fusion of multi-sensor imagery from UAV**. *Precision Agriculture*, v. 24, n. 6, p. 2327–2349, 2023. DOI: 10.1007/s11119-023-10042-8

YANG, L. **Accurate and precise determination of isotopic ratios by MC-ICP-MS: a review**. *Mass Spectrometry Reviews*, v. 28, n. 6, p. 990-1011, 22 out. 2009.

ZAMAN-ALLAH, M. et al. **Unmanned aerial platform-based multi-spectral imaging for field phenotyping of maize**. *Plant Methods*, v. 11, n. 1, 2015. DOI: 10.1186/s13007-015-0078-2

ZANON, A. J. et al. **Contribuição das ramificações e a evolução do índice de área foliar em cultivares modernas de soja**. *Bragantia*, v. 74, n. 3, p. 279–290, 2015. DOI: 10.1590/1678-4499.0463