

WESTEFANN DOS SANTOS SOUSA

**REINOCULAÇÃO DE *Rhizobium tropici* EM CULTIVARES DE FEIJÃO-COMUM
COM DIFERENTES HÁBITOS E CICLOS DE CRESCIMENTO MEDIANTE
PULVERIZAÇÃO DO INÓCULO EM PÓS-EMERGÊNCIA**

Botucatu

2025

WESTEFANN DOS SANTOS SOUSA

**REINOCULAÇÃO DE *Rhizobium tropici* EM CULTIVARES DE FEIJÃO-COMUM
COM DIFERENTES HÁBITOS E CICLOS DE CRESCIMENTO MEDIANTE
PULVERIZAÇÃO DO INÓCULO EM PÓS-EMERGÊNCIA**

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Doutor em Agronomia (Agricultura).

Orientador: Rogério Peres Soratto

Botucatu

2025

S725r	Sousa, Westefann dos Santos Reinoculação de <i>Rhizobium tropici</i> em cultivares de feijão-comum com diferentes hábitos e ciclos de crescimento mediante pulverização do inóculo em pós-emergência / Westefann dos Santos Sousa. -- Botucatu, 2025 162 p. : il., tabs., fotos Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu Orientador: Rogério Peres Soratto 1. <i>Phaseolus vulgaris</i>. 2. Otimização da FBN. 3. <i>Rhizobium tropici</i>. 4. Suplementação de N. 5. Inoculação suplementar. I. Título.
-------	--

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: REINOCULAÇÃO DE *Rhizobium tropici* EM CULTIVARES DE FEIJÃO-COMUM COM DIFERENTES HÁBITOS E CICLOS DE CRESCIMENTO MEDIANTE PULVERIZAÇÃO DO INÓCULO EM PÓS-EMERGÊNCIA

AUTOR: WESTEFANN DOS SANTOS SOUSA

ORIENTADOR: ROGÉRIO PERES SORATTO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Agricultura), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ROGÉRIO PERES SORATTO (Participação Virtual)
Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas - Unesp Botucatu

Documento assinado digitalmente
 **ROGERIO PERES SORATTO**
Data: 03/09/2025 21:59:04-0300
Verifique em <https://validar.itu.gov.br>

Prof.^a Dr.^a ITAMAR ROSA TEIXEIRA (Participação Virtual)
Instituto de Ciências Agrárias / Universidade Estadual de Goiás

Documento assinado digitalmente
 **ITAMAR ROSA TEIXEIRA**
Data: 04/09/2025 10:42:04-0300
Verifique em <https://validar.itu.gov.br>

Pesquisador Dr. FERNANDO VIEIRA COSTA GUIDORIZZI (Participação Virtual)
Pesquisa & Desenvolvimento e Desenvolvimento de Mercado / Corteva Agriscience

Documento assinado digitalmente
 **FERNANDO VIEIRA COSTA GUIDORIZZI**
Data: 04/09/2025 13:57:13-0300
Verifique em <https://validar.itu.gov.br>

Prof. Dr. ADALTON MAZETTI FERNANDES (Participação Virtual)
Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas - Unesp Botuca

Documento assinado digitalmente
 **ADALTON MAZETTI FERNANDES**
Data: 04/09/2025 15:19:19-0300
Verifique em <https://validar.itu.gov.br>

Prof.^a Dr.^a MARIA PAULA BARION ALVES NUNES (Participação Virtual)
Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu

Documento assinado digitalmente
 **MARIA PAULA BARION ALVES NUNES**
Data: 04/09/2025 14:52:47-0300
Verifique em <https://validar.itu.gov.br>

Botucatu, 01 de setembro de 2025

Dedico este trabalho à minha mãe,
Maria Rosélia, que sob muito “sol”, fez-me
chegar até aqui, na “sombra”.

AGRADECIMENTOS

A jornada do Doutorado é um caminho que não se percorre sozinho. Cada passo, cada desafio superado, foi impulsionado pelo apoio incondicional e pela colaboração de pessoas e instituições que se tornaram pilares fundamentais. É com o coração transbordando de gratidão que escrevo este agradecimento, um reflexo do imenso apoio que tornou esta tese uma realidade.

Em primeiro lugar, meu mais profundo e sincero agradecimento à minha amada mãe, Maria Rosélia. Sua força, dedicação e amor inabalável foram a base e a inspiração para cada conquista. Este trabalho é, em grande parte, fruto de sua crença em meu potencial. À minha família, meu muito obrigado por toda a base emocional, por ser meu alicerce e por acreditarem em mim em cada passo.

Aos Técnicos da Fazenda Experimental de São Manuel e Botucatu, meu reconhecimento pela inestimável colaboração e por todo o suporte essencial durante a realização dos experimentos de campo. A dedicação de vocês foi crucial para o sucesso desta pesquisa.

Ao Laboratório Solo-Planta e ao Laboratório LECA, agradeço imensamente por todo o suporte técnico e pela infraestrutura disponibilizada para as análises laboratoriais, que foram fundamentais para a concretização deste estudo.

Minha gratidão se estende à Embrapa Soja, à Agrocete e ao Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná – IAPAR pela generosidade e disponibilidade em doar os insumos necessários, tornando possível a execução desta pesquisa.

Aos Técnicos e Professores do Departamento de Melhoramento e Produção Vegetal, meu muito obrigado por todo o compartilhamento de conhecimento, pela orientação e pelo suporte sempre presente, que enriqueceram minha formação e este trabalho.

Aos amigos que se tornaram família, Jaqueline Marcon e Adevair Bataiel, agradeço por compartilharem suas vidas comigo, por cada momento de alegria e por serem um porto seguro.

Aos amigos que me ajudaram incansavelmente, Gyslane Garreto, Anderson Romão, Júlio César e Bárbara Silva, meu reconhecimento pela dedicação, paciência e apoio irrestrito em todas as etapas. A colaboração de vocês foi um diferencial.

E aos amigos que conheci em Botucatu e que ficaram eternizados em minha memória – Marcela Pacola, Tassiane Sanchez, Rafael Barroca, Eduardo Aires, Matheus Milani

e tantos outros – obrigado por cada risada, por cada troca e por tornarem essa fase ainda mais especial.

Ao Professor Rogério Soratto, minha profunda gratidão pela orientação exemplar, pela paciência e pela sabedoria transmitida ao longo de todo o Doutorado. Seus ensinamentos foram a bússola que guiou este trabalho.

Ao CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudos concedida (processo nº 141190/2021-3).

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meu mais sincero e eterno agradecimento.

RESUMO

A importância da fixação biológica de nitrogênio (FBN) em leguminosas, especialmente no feijão-comum, é uma alternativa em potencial para reduzir a dependência de fertilizantes nitrogenados, que são econômica e ambientalmente impactantes. Diante disto, surgem algumas alternativas para fornecimento de nitrogênio (N), visando substituir parcialmente e/ou totalmente os fertilizantes nitrogenados na cultura. Uma delas é a reinoculação com *Rhizobium tropici* em pós-emergência, uma prática que visa otimizar a FBN e, consequentemente, a absorção de N pelas plantas. Diante do exposto, o objetivo desse trabalho foi avaliar o acúmulo de matéria seca e N na parte aérea, a FBN, a nutrição, a produtividade de grãos, o teor de proteína bruta nos grãos de cultivares de feijão-comum em resposta aos manejos de reinoculação de *Rhizobium tropici*, mediante pulverização complementar do inóculo em pós-emergência, bem como a eficiência econômica deste manejo. A pesquisa foi conduzida com experimentos em casa de vegetação e de campo. Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação (Botucatu/SP) e em campo (São Manuel/SP e Botucatu/SP). Foram utilizadas três cultivares de feijão-comum (IPR Andorinha, IPR Campos Gerais e TAA Dama). Os tratamentos incluíram: ausência de inoculação e adubação nitrogenada (controle), inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização do inoculante líquido (em casa de vegetação foram utilizadas três doses do inoculante e a dose que melhor performou foi utilizada em campo); fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N-mineral na semeadura e cobertura, respectivamente (somente nos experimentos de campo); fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente. A reinoculação com *Rhizobium* em pós-emergência demonstrou potencial para aumentar a nodulação, o acúmulo de N e a produtividade de grãos das cultivares IPR Campos Gerais e TAA Dama, especialmente em condições de campo. Embora a inoculação com *Rhizobium* tenha consistentemente otimizado a nodulação das plantas, o teor e acúmulo de N, e consequentemente, a produtividade de grãos, foram consideravelmente mais elevados com a fertilização com N-mineral, especialmente na dose de 120 kg ha⁻¹, o que demonstra a alta dependência do feijão-comum à adubação com N-mineral. É importante salientar que, em algumas condições específicas de campo, a inoculação desempenhou resultados comparáveis

ao N-mineral em dose mais baixas, sugerindo que a eficácia da inoculação pode variar dependendo do local, cultivar e variáveis específicas. A análise econômica indicou que a reinoculação pode ser uma prática rentável, dependendo dos custos dos insumos e do preço do feijão.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris*; otimização da FBN; *Rhizobium tropici*; suplementação de N; inoculação suplementar.

ABSTRACT

The importance of biological nitrogen fixation (BNF) in legumes, especially common beans, is a potential alternative to reduce dependence on nitrogen fertilizers, which are economically and environmentally damaging. Therefore, several alternatives for nitrogen (N) supply have emerged, aiming to partially or completely replace nitrogen fertilizers in the crop. One of these is post-emergence re-inoculation with *Rhizobium tropici*, a practice that aims to optimize BNF and, consequently, plant N uptake. Therefore, the objective of this study was to evaluate shoot dry matter and N accumulation, BNF, nutrition, grain yield, and crude protein content in grains of common bean cultivars in response to *Rhizobium tropici* re-inoculation management, through supplemental spraying of the inoculum post-emergence, as well as the economic efficiency of this management. The research was conducted using greenhouse and field experiments. The experiments were conducted in a greenhouse (Botucatu, SP) and in the field (São Manuel, SP and Botucatu, SP). Three common bean cultivars (IPR Andorinha, IPR Campos Gerais, and TAA Dama) were used. Treatments included: no inoculation and nitrogen fertilization (control); seed inoculation with *Rhizobium* exclusively; seed inoculation + post-emergence reinoculation with liquid inoculant spraying (three inoculant doses were used in the greenhouse, and the best-performing dose was used in the field); nitrogen fertilization with 20 and 40 kg ha⁻¹ of mineral N at sowing and sidedressing, respectively (only in the field experiments); nitrogen fertilization with 40 and 80 kg ha⁻¹ of mineral N at sowing and sidedressing, respectively. Post-emergence *Rhizobium* inoculation demonstrated potential for increasing nodulation, N accumulation, and grain yield in the IPR Campos Gerais and TAA Dama cultivars, especially under field conditions. Although *Rhizobium* inoculation consistently optimized plant nodulation, N content and accumulation, and consequently, grain yield, were considerably higher with mineral-N fertilization, especially at a rate of 120 kg ha⁻¹, demonstrating the high dependence of common bean on mineral-N fertilization. It is important to note that, under some specific field conditions, inoculation yielded comparable results to mineral-N at lower rates, suggesting that inoculation efficacy may vary depending on the site, cultivar, and specific variables. The economic analysis indicated that reinoculation can be a profitable practice, depending on input costs and bean prices.

Keywords: Phaseolus vulgaris; BNF optimization; *Rhizobium tropici*; N supplementation; supplemental inoculation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Temperaturas máximas, mínimas e médias do ar diárias e valores de graus-dia (GD) acumulados ao longo do ciclo das cultivares de feijão-comum para os estádios fenológicos de desenvolvimento vegetativo (V4) e reprodutivo (R6, R8 e R9), no experimento conduzido em casa de vegetação40
- Figura 2 – Temperaturas máxima e mínima, precipitação e irrigação diárias registradas nas áreas experimentais em São Manuel (I e II), São Paulo, Brasil, durante os períodos de março a julho de 2022 (A) e de agosto a novembro de 2022 (B).....47
- Figura 3 – Temperaturas máxima e mínima, precipitação e irrigação diárias registradas nas áreas experimentais em Botucatu (I e II), São Paulo, Brasil, de setembro a dezembro de 2022 (A) e de março a junho de 2023 (B).....48
- Figura 4 – Fluxograma do processo da análise econômica realizada nos dois experimentos de campo conduzidos em Botucatu60
- Figura 5 – Desdobramento entre cultivares (IPR Andorinha, IPR Campos Gerais e TAA Dama) e formas para fornecimento de N, para a variável teor de N na parte aérea (TN) do feijão-comum nos estádios R6 (A) e R8 (B), e quantidade de N total acumulado na parte aérea em R8 (C), em condições de casa de vegetação. Letras minúsculas comparam as cultivares dentro de cada forma de fornecimento de N, enquanto letras maiúsculas comparam as formas de fornecimento de N dentro de cada cultivar com valor de $p < 0,05$ de acordo com o teste de Tukey68
- Figura 6 – Desdobramento entre cultivares (IPR Andorinha, IPR Campos Gerais e TAA Dama) e as diferentes formas para fornecimento de N, para a variável massa de grãos por planta (MGP) do feijão-comum no estágio fenológico R9 em condições de casa de vegetação. Letras minúsculas comparam as cultivares dentro de cada forma de fornecimento de N, enquanto letras maiúsculas comparam as formas de fornecimento de N dentro de cada cultivar com valor de $p < 0,05$ de acordo com o teste de Tukey.....70
- Figura 7 – Análise de componentes principais (PCA) do experimento conduzido em casa de vegetação com três cultivares (IPR Andorinha, IPR Campos Gerais e TAA Dama) e diferentes formas para fornecimento de N.....72
- Figura 8 – Desdobramento entre experimentos (São Manuel I e II, Botucatu I e II) e as diferentes formas para fornecimento de N, para a variável índice relativo de clorofila do feijão-comum no estágio fenológico R8. Letras minúsculas comparam os experimentos dentro de cada forma de fornecimento de N, enquanto letras maiúsculas comparam as formas de fornecimento de N dentro de cada experimento com valor de $p < 0,05$ de acordo com o teste de Tukey.....80

- Figura 9 – Desdobramento entre experimentos (São Manuel I e II, Botucatu I e II) e as diferentes formas para fornecimento de N, para a variável teor de N na parte aérea (A), teor de N na folha diagnose (B) e quantidade de N total acumulado na parte aérea (C) no estágio fenológico R6. Letras minúsculas comparam os experimentos dentro de cada forma de fornecimento de N, enquanto letras maiúsculas comparam as formas de fornecimento de N dentro de cada experimento com valor de $p < 0,05$ de acordo com o teste de Tukey 81
- Figura 10 – Desdobramento entre experimentos (São Manuel I e II, Botucatu I e II) e as diferentes formas para fornecimento de N, para a variável massa de 100 grãos do feijão-comum (cv. TAA Dama) no estágio fenológico R9. Letras minúsculas comparam os experimentos dentro de cada forma de fornecimento de N, enquanto letras maiúsculas comparam as formas de fornecimento de N dentro de cada experimento com valor de $p < 0,05$ de acordo com o teste de Tukey 84
- Figura 11 – Desdobramento entre experimentos (São Manuel I e II, Botucatu I e II) e as diferentes formas para fornecimento de N, para as variáveis teor de N nos grãos (A) e teor de proteína bruta nos grãos (B) do feijão-comum cv. TAA Dama. Letras minúsculas comparam os experimentos dentro de cada forma de fornecimento de N, enquanto letras maiúsculas comparam as formas de fornecimento de N dentro de cada experimento com valor de $p < 0,05$ de acordo com o teste de Tukey 86
- Figura 12 – Desdobramento entre cultivares e as diferentes formas para fornecimento de N, para as variáveis matéria seca de nódulos (A) e matéria seca por nódulo (B) do feijão-comum, no estágio fenológico R8, no experimento de campo conduzido em Botucatu I. Letras minúsculas comparam as cultivares dentro de cada forma de fornecimento de N, enquanto letras maiúsculas comparam as formas de fornecimento de N dentro de cada cultivar com valor de $p < 0,05$ de acordo com o teste de Tukey 93
- Figura 13 – Desdobramento entre cultivares e as diferentes formas para fornecimento de N, para as variáveis teor de N na parte aérea (A) do feijão-comum no estágio fenológico R6 e índice relativo de clorofila (B) em R8 no experimento de campo conduzido em Botucatu II. Letras minúsculas comparam as cultivares dentro de cada forma de fornecimento de N, enquanto letras maiúsculas comparam as formas de fornecimento de N dentro de cada cultivar com valor de $p < 0,05$ de acordo com o teste de Tukey 98
- Figura 14 – Acúmulo de matéria seca na parte aérea (MSPA) ao longo do ciclo das cultivares de feijão-comum IPR Andorinha (A e B), IPR Campos Gerais (C e D) e TAA Dama (E e F) cultivadas nos dois experimentos conduzidos em Botucatu e submetidas a diferentes formas para fornecimento de N. As barras verticais indicam os valores de DMS entre as formas de fornecimento de N pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$) em cada dia de amostragem (DAE). * e ** são: significativo a 5 e 1% de probabilidade de acordo com o teste F, respectivamente 101

- Figura 15 – N total acumulado na parte aérea (NAPA) ao longo do ciclo das cultivares de feijão-comum IPR Andorinha (A e B), IPR Campos Gerais (C e D) e TAA Dama (E e F) cultivadas nos dois experimentos conduzidos em Botucatu e submetidas a diferentes formas para fornecimento de N. As barras verticais indicam os valores de DMS entre as formas de fornecimento de N pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$) em cada dia de amostragem (DAE). * e ** são: significativo a 5 e 1% de probabilidade de acordo com o teste F, respectivamente 104
- Figura 16 – Análise de componentes principais (PCA) dos experimentos conduzidos em Botucatu com três cultivares (IPR Andorinha, IPR Campos Gerais e TAA Dama) e diferentes formas para fornecimento de N 115
- Figura 17 – Variação do preço médio anual da ureia em toneladas (A), dose do inoculante (B) e da saca de feijão (C) em uma série histórica de 2014-2024 118
- Figura 18 – Custo de cada tratamento (CT), em função dos anos (2014-2024), de dois experimentos conduzidos em Botucatu com três cultivares (IPR Andorinha, IPR Campos Gerais e TAA Dama) e quatro formas para fornecimento de N 119
- Figura 19 – Incremento da produtividade de três cultivares (IPR Andorinha, IPR Campos Gerais e TAA Dama) em função das diferentes formas para fornecimento de N em dois experimentos de campo conduzidos em Botucatu. Letras minúsculas comparam as formas de fornecimento de N dentro de cada cultivar com valor de $p < 0,05$ de acordo com o teste de Tukey..... 120
- Figura 20 – Acréscimo da receita bruta (ARB), em função dos anos (2014-2024), de dois experimentos conduzidos em Botucatu com três cultivares (IPR Andorinha – “A”, IPR Campos Gerais – “B” e TAA Dama – “C”) e quatro formas para fornecimento de N 122
- Figura 21 – Acréscimo da receita líquida (ARL), em função dos anos (2014-2024), de dois experimentos conduzidos em Botucatu com três cultivares (IPR Andorinha – “A”, IPR Campos Gerais – “B” e TAA Dama – “C”) e quatro formas para fornecimento de N 123
- Figura 22 – Simulação para o custo de cada tratamento (CT) de dois experimentos conduzidos em Botucatu com três cultivares (IPR Andorinha – “A”, IPR Campos Gerais – “B” e TAA Dama – “C”) e quatro formas para fornecimento de N em função de dois cenários econômicos (mais favorável e mais desfavorável)..... 125
- Figura 23 – Simulação para o acréscimo da receita bruta (ARB) de dois experimentos conduzidos em Botucatu com três cultivares (IPR Andorinha – “A”, IPR Campos Gerais – “B” e TAA Dama – “C”) e quatro formas para fornecimento

de N em função de dois cenários econômicos (mais favorável e mais desfavorável) 126

Figura 24 – Simulação para o acréscimo da receita líquida (ARL) de dois experimentos conduzidos em Botucatu com três cultivares (IPR Andorinha – “A”, IPR Campos Gerais – “B” e TAA Dama – “C”) e quatro formas para fornecimento de N em função de dois cenários econômicos (mais favorável e mais desfavorável) 127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Atributos químicos e granulométricos do solo utilizado no experimento em condições de casa de vegetação	41
Tabela 2 – Tratamentos aplicados em três cultivares de feijão-comum (IPR Andorinha, IPR Campos Gerais e TAA Dama) em condições de casa de vegetação	42
Tabela 3 – Atributos químicos e granulométricos dos solos utilizados nos experimentos em condições de campo	49
Tabela 4 – Tratamentos (formas para fornecimento de N) aplicados nos experimentos em condições de campo	50
Tabela 5 – Tratamentos fitossanitários realizados na cultura do feijão-comum, em dois experimentos conduzidos em São Manuel.....	53
Tabela 6 – Tratamentos fitossanitários realizados na cultura do feijão-comum, em dois experimentos conduzidos em Botucatu.....	54
Tabela 7 – Teste de médias e resumo da análise de variância para o número de nódulos (NN), matéria seca de nódulos (MSN), matéria seca por nódulo (MSPN), matéria seca radicular (MSR) de cultivares de feijão-comum nos estádios fenológicos R6 e R8 submetidas a diferentes formas para fornecimento de N, em condições de casa de vegetação	64
Tabela 8 – Teste de médias e resumo da análise de variância para o índice relativo de clorofila no trifólio novo do ápice da planta (IRC�) e no trifólio velho da parte basal da planta (IRCV), matéria seca da parte aérea (MSPA), teor de N na parte aérea (TN) e quantidade de N total acumulado na parte aérea (NAPA) de cultivares de feijão-comum nos estádios fenológicos R6 e R8 submetidas a diferentes formas para fornecimento de N em condições de casa de vegetação	67
Tabela 9 – Teste de médias e resumo da análise de variância para o número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), massa de 100 grãos (M100G) e massa de grãos por planta (MGP) de cultivares de feijão-comum no estágio fenológico R9 submetidas a diferentes formas para fornecimento de N em condições de casa de vegetação	69
Tabela 10 – Teste de médias e resumo da análise de variância para o número de nódulos (NN), matéria seca de nódulos (MSN) e matéria seca por nódulo (MSPN) de feijão-comum (cv. TAA Dama) nos estádios fenológicos R6 e R8 submetido a diferentes formas para fornecimento de N, em quatro experimentos de campo	76
Tabela 11 – Teste de médias e resumo da análise de variância para o índice relativo de clorofila (IRC), matéria seca da parte aérea (MSPA), teor de N na parte	

aérea (TN), teor de N na folha diagnose (TNF) e quantidade de N total acumulado na parte aérea (NAPA) de feijão-comum (cv. TAA Dama) nos estádios fenológicos R6 e R8 submetido a diferentes formas para fornecimento de N em quatro experimentos de campo 79

Tabela 12 – Teste de médias e resumo da análise de variância para a população final de plantas (PFP), número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), massa de 100 grãos (M100G) e produtividade de grãos (PROD) de feijão-comum (cv. TAA Dama) no estágio fenológico R9 submetido a diferentes formas para fornecimento de N em quatro experimentos de campo..... 83

Tabela 13 – Teste de médias e resumo da análise de variância para o teor de N nos grãos (TNG), teor de proteína bruta nos grãos (TPG) e a produtividade de proteína bruta (PPB) de feijão-comum (cv. TAA Dama) submetido a diferentes formas para fornecimento de N em quatro experimentos de campo 85

Tabela 14 – Teste de médias e resumo da análise de variância para o número de nódulos (NN), matéria seca de nódulos (MSN), matéria seca por nódulo (MSPN) de cultivares de feijão-comum, no estágio fenológico R6, submetidas a diferentes formas para fornecimento de N, em dois experimentos de campo conduzidos em Botucatu 91

Tabela 15 – Teste de médias e resumo da análise de variância para o número de nódulos (NN), matéria seca de nódulos (MSN), matéria seca por nódulo (MSPN) de cultivares de feijão-comum no estágio fenológico R8 submetidas a diferentes formas para fornecimento de N em dois experimentos de campo conduzidos em Botucatu 92

Tabela 16 – Teste de médias e resumo da análise de variância para o índice relativo de clorofila (IRC), matéria seca da parte aérea (MSPA), teor de N na parte aérea (TN), teor de N na folha diagnose (TNF) e quantidade de N total acumulado na parte aérea (NAPA) de cultivares de feijão-comum no estágio fenológico R6 submetidas a diferentes formas para fornecimento de N em dois experimentos de campo conduzidos em Botucatu 96

Tabela 17 – Teste de médias e resumo da análise de variância para o índice relativo de clorofila (IRC), matéria seca da parte aérea (MSPA), teor de N na parte aérea (TN), teor de N na folha diagnose (TNF) e quantidade de N total acumulado na parte aérea (NAPA) de cultivares de feijão-comum no estágio fenológico R8 submetidas a diferentes formas para fornecimento de N em dois experimentos de campo conduzidos em Botucatu 97

Tabela 18 – Teste de médias para o teor de N na parte aérea ao longo do ciclo das cultivares de feijão-comum submetidas a diferentes formas para fornecimento de N em dois experimentos de campo conduzidos em Botucatu. Os dias de amostragem são representados pelos dias após a emergência (DAE) 107

Tabela 19 – Teste de médias e resumo da análise de variância para a população final de plantas (PFP), número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), massa de 100 grãos (M100G) e produtividade de grãos (PROD) de cultivares de feijão-comum no estágio fenológico R9 submetidas a diferentes formas para fornecimento de N em dois experimentos de campo conduzidos em Botucatu	110
Tabela 20 – Teste de médias e resumo da análise de variância para o teor de N nos grãos (TNG), teor de proteína bruta nos grãos (TPG) e a produtividade de proteína bruta (PPB) de cultivares de feijão-comum submetidas a diferentes formas para fornecimento de N em dois experimentos de campo conduzidos em Botucatu	112
Tabela 21 - Simulação para o retorno sobre o capital investido (RCI) de dois experimentos conduzidos em Botucatu com três cultivares (IPR Andorinha – “A”, IPR Campos Gerais – “B” e TAA Dama – “C”) e quatro formas para fornecimento de N em função de dois cenários econômicos (mais favorável e mais desfavorável).....	129

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
2	REVISÃO DE LITERATURA	29
2.1	A cultura do feijão-comum	29
2.2	Nutrição nitrogenada do feijoeiro-comum	31
2.3	Fixação biológica de nitrogênio no feijoeiro-comum.....	32
2.4	Formas de inoculação e reinoculação de rizóbio.....	35
3	MATERIAL E MÉTODOS	38
3.1	Caracterização das cultivares	38
3.2	Experimento de casa de vegetação	39
3.2.1	Caracterização das condições experimentais	39
3.2.2	Delineamento e condução do experimento	41
3.2.3	Avaliações realizadas em casa de vegetação	44
3.2.3.1	<i>Índice relativo de clorofila</i>	<i>44</i>
3.2.3.2	<i>Nodulação</i>	<i>44</i>
3.2.3.3	<i>Matéria seca de raízes e parte aérea</i>	<i>45</i>
3.2.3.4	<i>Teor e quantidade acumulado de N na parte aérea</i>	<i>45</i>
3.2.3.5	<i>Componentes agronômicos.....</i>	<i>45</i>
3.3	Experimento de campo	46
3.3.1	Localização e caracterização das áreas experimentais	46
3.3.2	Delineamento experimental e tratamentos	49
3.3.3	Instalação e condução dos experimentos	51
3.3.4	Avaliações realizadas em campo	55
3.3.4.1	<i>Índice relativo de clorofila</i>	<i>55</i>
3.3.4.2	<i>Diagnose foliar.....</i>	<i>55</i>
3.3.4.3	<i>Nodulação</i>	<i>55</i>
3.3.4.4	<i>Matéria seca da parte aérea.....</i>	<i>55</i>
3.3.4.5	<i>Teor e quantidade acumulado de N na parte aérea</i>	<i>56</i>
3.3.4.6	<i>População final das plantas.....</i>	<i>56</i>
3.3.4.7	<i>Componentes agronômicos e produtividade de grãos</i>	<i>56</i>
3.3.4.8	<i>Teor de N e proteína nos grãos.....</i>	<i>56</i>
3.3.4.9	<i>Produtividade de proteína</i>	<i>57</i>
3.3.4.10	<i>Análise econômica</i>	<i>57</i>

3.4	Análise estatística dos resultados	61
3.4.1	Experimento de casa de vegetação	61
3.4.2	Experimentos de campo	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
4.1	Doses de inoculante para reinoculação em cobertura (casa de vegetação)	63
4.2	Resposta da cv. TAA Dama à reinoculação em diferentes ambientes	75
4.3	Crescimento, acúmulo de nitrogênio e produtividade de três cultivares de feijoeiro-comum em resposta à reinoculação	88
4.4	Análise econômica dos experimentos de campo conduzidos com três cultivares em Botucatu.....	116
5	CONCLUSÕES.....	131
	REFERÊNCIAS	133
	APÊNDICE A – ANÁLISE DE REGRESSÃO POLINOMIAL PARA O NÚMERO DE NÓDULOS (NN), MATÉRIA SECA DE NÓDULOS (MSN) E MATÉRIA SECA POR NÓDULO (MSPN) DE CULTIVARES DE FEIJÃO-COMUM NOS ESTÁDIOS FENOLÓGICOS R6 E R8 SUBMETIDAS A DIFERENTES FORMAS PARA FORNECIMENTO DE N EM CONDIÇÕES DE CASA DE VEGETAÇÃO	145
	APÊNDICE B – ANÁLISE DE REGRESSÃO POLINOMIAL PARA A MATÉRIA SECA RADICULAR (MSR) E MATÉRIA SECA DA PARTE AÉREA (MSPA) DE CULTIVARES DE FEIJÃO-COMUM NOS ESTÁDIOS FENOLÓGICOS R6 E R8 SUBMETIDAS A DIFERENTES FORMAS PARA FORNECIMENTO DE N EM CONDIÇÕES DE CASA DE VEGETAÇÃO	146
	APÊNDICE C – ANÁLISE DE REGRESSÃO POLINOMIAL PARA PARA O ÍNDICE RELATIVO DE CLOROFILA NO TRIFÓLIO NOVO DO ÁPICE DO CAULE DA PLANTA (IRCN) E NO TRIFÓLIO VELHO DA PARTE BASAL DO COLO DA PLANTA (IRCV) DE CULTIVARES DE FEIJÃO-COMUM NOS ESTÁDIOS FENOLÓGICOS R6 E R8 SUBMETIDAS A DIFERENTES FORMAS PARA FORNECIMENTO DE N EM CONDIÇÕES DE CASA DE VEGETAÇÃO	147

APÊNDICE D – ANÁLISE DE REGRESSÃO POLINOMIAL PARA O TEOR DE N NA PARTE AÉREA (TN) E A QUANTIDADE DE N TOTAL ACUMULADO NA PARTE AÉREA (NAPA) DE FEIJÃO-COMUM NOS ESTÁDIOS FENOLÓGICOS R6 E R8 SUBMETIDAS A DIFERENTES FORMAS PARA FORNECIMENTO DE N EM CONDIÇÕES DE CASA DE VEGETAÇÃO.....	148
APÊNDICE E – ANÁLISE DE REGRESSÃO POLINOMIAL PARA O NÚMERO DE VAGENS POR PLANTA (NVP), NÚMERO DE GRÃOS POR VAGEM (NGV), MASSA DE 100 GRÃOS (M100G) E MASSA DE GRÃOS POR PLANTA (MGP) DE FEIJÃO-COMUM NOS ESTÁDIOS FENOLÓGICOS R6 E R8 SUBMETIDAS A DIFERENTES FORMAS PARA FORNECIMENTO DE N EM CONDIÇÕES DE CASA DE VEGETAÇÃO.....	149
APÊNDICE F – TESTE DE MÉDIAS E RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA OS TEORES FOLIARES DE MACRONUTRIENTES (FÓSFORO, POTÁSSIO, CÁLCIO, MAGNÉSIO E ENXOFRE) DE FEIJÃO-COMUM (CV. TAA DAMA) NO ESTÁDIO FENOLÓGICO R6 SUBMETIDO A DIFERENTES FORMAS PARA FORNECIMENTO DE N EM QUATRO EXPERIMENTOS DE CAMPO.....	150
APÊNDICE G – TESTE DE MÉDIAS E RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O TEOR FOLIAR DE MICRONUTRIENTES (COBRE, FERRO, MANGANÊS E ZINCO) DE FEIJÃO-COMUM (CV. TAA DAMA) NO ESTÁDIO FENOLÓGICO R6 SUBMETIDO A DIFERENTES FORMAS PARA FORNECIMENTO DE N EM QUATRO EXPERIMENTOS DE CAMPO	151
APÊNDICE H – TESTE DE MÉDIAS E RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA OS TEORES FOLIARES DE MACRONUTRIENTES (FÓSFORO, POTÁSSIO, CÁLCIO, MAGNÉSIO E ENXOFRE) DE CULTIVARES DE FEIJÃO-COMUM NO ESTÁDIO FENOLÓGICO R6 SUBMETIDAS A DIFERENTES FORMAS PARA FORNECIMENTO DE N EM DOIS EXPERIMENTOS DE CAMPO CONDUZIDOS EM BOTUCATU	152
APÊNDICE I – TESTE DE MÉDIAS E RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O TEOR FOLIAR DE MICRONUTRIENTES (COBRE,	

FERRO, MANGANÊS E ZINCO) DE CULTIVARES DE FEIJÃO-COMUM NO ESTÁDIO FENOLÓGICO R6 SUBMETIDAS A DIFERENTES FORMAS PARA FORNECIMENTO DE N EM DOIS EXPERIMENTOS DE CAMPO CONDUZIDOS EM BOTUCATU	153
APÊNDICE J – INSTALAÇÃO (“A” E “B”) E CONDUÇÃO (“C” E “D”) DO EXPERIMENTO EM CASA DE VEGETAÇÃO	154
APÊNDICE K – INSTALAÇÃO DOS EXPERIMENTOS CONDUZIDOS EM SÃO MANUEL I (A), SÃO MANUEL II (B), BOTUCATU I (C) E BOTUCATU II (D).....	155
APÊNDICE L – PLANTAS DE FEIJÃO-COMUM COM 5 (A), 20 (B), 50 (C) E 55 DIAS APÓS A EMERGÊNCIA (D) NO EXPERIMENTO I CONDUZIDO EM SÃO MANUEL/SP	156
APÊNDICE M – PLANTAS DE FEIJÃO-COMUM COM 20 (A), 25 (B), 45 (C) E 50 DIAS APÓS A EMERGÊNCIA (D) NO EXPERIMENTO II CONDUZIDO EM SÃO MANUEL/SP	157
APÊNDICE N – PLANTAS DE FEIJÃO-COMUM COM 5 (A), 25 (B), 40 (C) E 50 DIAS APÓS A EMERGÊNCIA (D) NO EXPERIMENTO I CONDUZIDO EM BOTUCATU/SP	158
APÊNDICE O – PLANTAS DE FEIJÃO-COMUM COM 5 (A), 15 (B), 40 (C) E 60 DIAS APÓS A EMERGÊNCIA (D) NO EXPERIMENTO II CONDUZIDO EM BOTUCATU/SP	159
APÊNDICE P – INOCULANTE TURFOSO (A), SEMENTES DE FEIJÃO-COMUM TRATADAS COM INOCULANTE TURFOSO (“B” E “C”) E INOCULANTE LÍQUIDO UTILIZADO NA REINOCULAÇÃO EM TODOS OS EXPERIMENTOS CONDUZIDOS	160
APÊNDICE Q – PLANTAS DE FEIJÃO-COMUM CULTIVARES TAA DAMA (DA), TAA CAMPOS GERAIS (CG) E IPR ANDORINHA (AN) NO ESTÁDIO FENOLÓGICO R8, SUBMETIDAS A DIFERENTES FORMAS PARA FORNECIMENTO DE N NO EXPERIMENTO II CONDUZIDO EM BOTUCATU.....	161
APÊNDICE R – PLANTAS DE FEIJÃO-COMUM CULTIVARES TAA DAMA (DA), TAA CAMPOS GERAIS (CG) E IPR ANDORINHA (AN) NO ESTÁDIO FENOLÓGICO R8, SUBMETIDAS A DIFERENTES FORMAS	

PARA FORNECIMENTO DE N NO EXPERIMENTO II CONDUZIDO EM BOTUCATU	162
---	-----

1 INTRODUÇÃO

O feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma leguminosa com alto teor de nitrogênio (N) nos grãos e demais tecidos da planta, o que torna este um dos nutrientes mais extraídos e exportados por essa espécie (Fonseca *et al.*, 2013; Soratto *et al.*, 2013). O N desempenha função de suma importância no crescimento e desenvolvimento vegetal, fazendo parte de processos metabólicos básicos, como a fotossíntese, respiração, absorção de íons de outros nutrientes, diferenciação celular e síntese de proteínas (Gaudinier *et al.*, 2018).

Além da adubação nitrogenada mineral, existem outras técnicas que constituem fontes capazes de fornecer N às plantas. O processo mais comumente utilizado entre os produtores de feijão, sendo também alvo de pesquisas científicas, é a fixação biológica de N (FBN), que, por intermédio de bactérias diazotróficas, o N atmosférico (N₂) é reduzido a amônia (NH₃), seguido da incorporação em formas nitrogenadas que podem ser assimiladas pela leguminosa (Hungria *et al.*, 2013). Naturalmente, todas as leguminosas possuem a capacidade de interação com bactérias fixadoras do N₂ (Silva *et al.*, 2016). No caso do feijão-comum, tem-se declarado que esta espécie possui um baixo potencial em fixar o N₂, devido à sua alta promiscuidade, fazendo simbiose com estirpes de rizóbio nativas pouco eficientes (Mwenda *et al.*, 2023; Shamseldin e Velázquez, 2020), bem como, às condições do solo e do ambiente (Sousa *et al.* 2022a; Yadegari e Rahmani, 2010), tornando necessária a utilização da adubação nitrogenada para maximizar a produtividade da cultura.

No entanto, em termos ecológicos, a aplicação excessiva de fertilizantes nitrogenados tem efeitos negativos no ambiente, como a eutrofização (Gaudinier *et al.*, 2018). Outro motivo, pelo qual é importante os estudos envolvendo a redução da fertilização com N mineral, está relacionado às possíveis perdas de N no solo, seja por carreamento superficial (enxurrada), lixiviação, volatilização ou desnitrificação, que reduz o aproveitamento pelas plantas do N aplicado sob a forma de fertilizantes (Ma *et al.*, 2019). Soma-se a isto o elevado custo do insumo nitrogenado, principalmente em países que importam boa parte deste, a exemplo do Brasil (Schmidhuber e Qiao, 2022; Shibata *et al.*, 2017). Sendo assim, os inoculantes microbianos são uma alternativa mais acessível aos produtores, principalmente àqueles que produzem em pequena escala, mas que pode potencializar os ganhos

dos produtores de feijão-comum, independentemente de sua tecnificação e escala de produção.

Certo de que a tecnologia de inoculação rizobial tem futuro promissor na cultura do feijoeiro-comum, pesquisas em todo o mundo têm juntado esforços com o objetivo de reduzir e/ou substituir a fertilização com N mineral, por técnicas mais econômicas e sustentáveis. Neste sentido, são relatadas as mais diversas formas de inoculação rizobial, além da feita exclusivamente na semente. A reinoculação, por exemplo, surge como uma nova forma de complementar a inoculação feita via semente, com pulverização do rizóbio em pós-emergência.

Apesar de relatos sobre os efeitos benéficos da reinoculação na cultura do feijoeiro-comum (Martins *et al.*, 2024; Sousa *et al.*, 2022b), ainda não está claro se esta nova técnica de inoculação poderá ser utilizada, substituindo parcial ou totalmente a fertilização nitrogenada, sem causar perdas na produtividade de grãos da cultura. Por este motivo, são necessários estudos que contribuam na formação de um posicionamento sólido quanto à aplicação do inoculante rizobial em pós-emergência (reinoculação) em complementação a inoculação realizada na semente no momento da semeadura, comparando-se com a prática convencional para fornecimento de N via adubação nitrogenada.

Portanto, nesse estudo foram levantadas as seguintes hipóteses: a) a reinoculação feita em pós-emergência minimiza a senescência dos nódulos ao longo do desenvolvimento da cultura, o que refletirá na superação do período crítico para a FBN na fase reprodutiva da cultura; b) a prática de reinoculação potencializa a atividade de nódulos e a contribuição da FBN para a nutrição da cultura, consequentemente, reflete em maior produtividade e qualidade proteica dos grãos; e c) a depender da cultivar, com base no seu hábito de crescimento/ciclo, os efeitos da reinoculação apresenta resultados distintos sobre a produtividade de grãos e, consequentemente, o retorno econômico.

Diante do exposto, se propôs o presente estudo com o objetivo de avaliar o efeito da reinoculação de *Rhizobium tropici*, mediante pulverização complementar do inóculo em pós-emergência, na nodulação, acúmulo de matéria seca e N, FBN, nutrição mineral, produtividade de grãos e teor de proteína bruta nos grãos, de cultivares de feijão-comum com diferentes hábitos de crescimento/ciclos, bem como a eficiência econômica desta prática.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura do feijão-comum

O feijão-comum é uma das leguminosas mais cultivadas e consumidas no mundo, especialmente em países da América Latina, Ásia e África, onde é um alimento básico para as classes de menor poder aquisitivo (Heinemann *et al.*, 2024; Lisciani *et al.*, 2024; Uebersax *et al.*, 2023). No Brasil, a leguminosa é cultivada em todas as regiões do território brasileiro, tornando-a uma forte aliada na economia do país (Tarsitano *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2008).

No ano de 2022, o Brasil ocupava a segunda colocação na produção mundial de feijão, com uma produção de 2,84 milhões de toneladas, ficando apenas atrás da Índia (6,6 milhões), conforme dados da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) (Ritchie *et al.*, 2023). Informações mais atualizadas da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) estimam uma produção nacional de aproximadamente 3,2 milhões de toneladas na safra 2023/24, incluindo os feijões de cores e preto (*P. vulgaris*) e feijão-caupi [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] (Conab, 2024a).

Apesar da sua ampla adaptação e distribuição geográfica, o feijoeiro-comum é pouco tolerante a fatores extremos do ambiente, sendo uma cultura relativamente exigente no que diz respeito à maioria das condições edafoclimáticas (Silva *et al.*, 2020). O feijoeiro-comum é uma planta de ciclo curto, o que significa que pode ser cultivado e colhido em um período de três a cinco meses, dependendo das condições climáticas e da cultivar. Por ser uma cultura de estação quente, sendo sensível ao frio intenso e ao excesso de umidade, possui maior adaptabilidade em climas tropicais e subtropicais (Pereira *et al.*, 2014; Ribeiro, 2011; Hoffmann Júnior *et al.*, 2007).

O ciclo curto do feijoeiro-comum, em relação a outras leguminosas, permite adequar o seu cultivo dentro de uma janela menor de produção, com a possibilidade da semeadura em até três momentos durante o mesmo ano agrícola no Brasil (Conab, 2024a). A primeira safra (das águas ou safra de verão), com plantio nos meses de agosto a novembro e colheita de novembro a fevereiro; a segunda (safra da seca ou safrinha), com plantio de dezembro a março e colheita de março a junho; e a terceira (safra de inverno ou irrigada), com plantio de abril a julho e colheita de julho a outubro (Wander, 2007).

Na segunda safra, o plantio é planejado para ser cultivado entre janeiro e maio, ocupando 50% da extensão de plantio e representando 43% da produção. Como principal característica desta safra, chamada de “safrinha” ou “safra da seca”, é a realização em período de menor incidência de chuvas. Sua realização é feita nas Regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e em uma época exclusiva de plantio no Norte, onde o feijão-comum é plantado juntamente com o milho em sistema consorciado. Esse ciclo de produção acontece entre os meses de dezembro a abril (Conab, 2024a).

A terceira safra é plantada entre os meses de março e julho, dependendo da região, e colhida principalmente entre agosto e setembro. Também conhecida como safra sob irrigação, “de inverno” ou simplesmente terceira safra, ocorre em regiões com invernos amenos e secos, clima propício para o cultivo de algumas cultivares de feijão-comum, principalmente o feijão-preto e o carioca. Nas regiões produtoras, o feijão é plantado de abril a outubro, ocupando cerca de 17% da extensão total e contribuindo com 24% da produção do país (Conab, 2024a).

O feijoeiro-comum é uma planta anual, propagada por sementes e apresenta ciclo entre 60 e 120 dias, dependendo do tipo e hábito de crescimento, cultivar e condições ambientais (Silva *et al.*, 2020). A escala de desenvolvimento fenológico é dividida nas fases vegetativas e reprodutivas, que, por sua vez, são subdivididas em 10 estádios: V0 (germinação); V1 (emergência); V2 (folhas primárias); V3 (primeira folha trifoliolada); V4 (terceira folha trifoliolada); R5 (botões florais); R6 (florescimento); R7 (formação das vagens); R8 (formação dos grãos e enchimento das vagens); R9 (maturação) (Oliveira *et al.*, 2023).

Nos diferentes estádios fenológicos, as plantas de feijão-comum têm necessidades diferentes por nutrientes e água. Por exemplo, estresses causados por déficit hídrico em V4 (o estágio mais longo do feijoeiro), competição com plantas daninhas, deficiência nutricional (principalmente de N, P e K) e fitotoxicidade, podem afetar diretamente o crescimento do feijoeiro e consequentemente reduzir a produtividade (Silva *et al.*, 2020). Outro ponto importante é a exportação média de N pela cultura, que pode variar entre 24 a 36 kg de N por tonelada de grãos produzida, com maior extração ocorrendo durante a floração (R5-R6) e o enchimento de grãos (R8) (Guidorizzi *et al.*, 2023; Silva e Moreira, 2022; Soratto *et al.*, 2013). Portanto, a deficiência de N é um dos principais fatores limitantes da produtividade do feijoeiro (Maia *et al.*, 2017; Soratto *et al.*, 2014; Soratto *et al.*, 2013).

2.2 Nutrição nitrogenada do feijoeiro-comum

A nutrição nitrogenada do feijoeiro-comum é um aspecto fundamental para o seu desenvolvimento e produtividade, já que o N é o nutriente mineral absorvido em maior quantidade pela planta (Guidorizzi *et al.*, 2023; Santos *et al.*, 2023; Soratto *et al.*, 2013). Esse nutriente desempenha diversas funções metabólicas na planta, dentre elas: constituinte de aminoácidos, proteínas e ácidos nucleicos; participa dos processos de absorção iônica, fotossíntese, respiração, sínteses em geral, multiplicação e diferenciação celular, estimula o crescimento de raízes e o desenvolvimento de gemas floríferas e frutíferas (Gaudinier *et al.*, 2018). Assim, a deficiência de N inibe, rapidamente, o crescimento e desenvolvimento vegetal.

Atualmente, existem 275 cultivares de feijão-comum registradas no Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento – MAPA, as quais apresentam diferenças entre si quanto a ciclo, tolerância e/ou resistência a patógenos, hábitos de crescimento, potencial produtivo e exigências nutricionais (Mapa, 2024). As exigências nutricionais dessas cultivares podem variar em função da época de semeadura, características genéticas de cada planta quanto a absorção, assimilação e redistribuição de nutrientes; duração de cada estágio de desenvolvimento; hábitos de crescimento e duração do ciclo (Guidorizzi *et al.*, 2023; Silva e Moreira, 2022).

O feijoeiro necessita de quantidades adequadas de N em todas as fases do seu ciclo de crescimento. Na fase vegetativa, especificamente o estágio V4, que se inicia quando a terceira folha trifoliolada encontra-se aberta e plana, o crescimento e absorção de nutrientes se aceleram e, portanto, todos os nutrientes devem estar à disposição para serem absorvidos, principalmente o N (Guidorizzi *et al.*, 2023; Embrapa, 2018; Soratto *et al.*, 2013). Há uma tendência de aumento significativo pela demanda de N durante períodos de rápido crescimento, sendo que o período de maior demanda ocorre nos estádios de pré-florescimento (R₅) e florescimento pleno (R₆), quando a taxa de absorção é elevada (Guidorizzi *et al.*, 2023; Silva e Moreira, 2022; Soratto *et al.*, 2013).

Guidorizzi *et al.* (2023) realizaram um trabalho com o intuito de disponibilizar dados sobre a extração e exportação de macros e micronutrientes para a cultura do feijão-comum, com as cultivares BRS Estilo (ciclo médio/tardio) e a IAC Polaco (ciclo precoce). Os autores relataram que as cultivares iniciaram as extrações de N logo após a emergência e foi se incrementando até o estágio de desenvolvimento R8. Entre

a emergência e o estágio de desenvolvimento V_3 a cv. BRS Estilo extraiu aproximadamente 7,0% de N do total extraído, enquanto a cv. IAC Polaco extraiu 10%. A partir do estágio de desenvolvimento V_3 , ambas as cultivares de feijão-comum intensificaram as extrações de N. Até o estágio R6, as extrações de N pela cv. BRS Estilo alcançaram cerca de 50% do total, enquanto na IAC Polaco algo em torno de 64%.

Diante desses resultados, Guidorizzi et al. (2023) notaram que, entre a emergência e o estágio R6, a cv. IAC Polaco, por apresentar ciclo médio-precoce, extraiu maiores quantidades de N em relação a BRS Estilo de ciclo médio. Até o estágio R8, ambas as cultivares estudadas atingiram as extrações máximas de N. Nesse sentido, a BRS Estilo extraiu 230 kg de N ha^{-1} e a IAC Polaco extraiu 181 kg ha^{-1} de N. Essa maior extração de N pela BRS Estilo, segundo os autores mencionados, está associada ao seu maior acúmulo de matéria seca (MS) na parte aérea (9.592 kg ha^{-1}). Normalmente, cultivares de feijão-comum de ciclo médio e hábito de crescimento indeterminado acumulam maiores quantidades de MS do que as cultivares de ciclo precoce e, conseqüentemente, apresentam maiores extrações de nutrientes.

Cerca de 50-60% do N absorvido pelas plantas de feijoeiro-comum são exportados para os grãos (Soratto et al., 2013). Guidorizzi et al. (2023) relataram que a cv. BRS Estilo extraiu 73 kg ha^{-1} de N em cada tonelada de grãos. Dessa quantidade, foram exportados 36 kg ha^{-1} de N para cada tonelada de grãos, o que resulta em exportação relativa de 49% de N. Já para a cv. IAC Polaco, a extração foi de 60 kg ha^{-1} de N para cada tonelada de grãos, sendo exportados 36 kg ha^{-1} de N em cada tonelada de grãos, ou seja, uma exportação relativa de 61% de N. Portanto, observa-se que em termos de extrações e exportações de nutrientes, o N é um dos nutrientes pilares para o crescimento e desenvolvimento produtivo do feijão-comum.

2.3 Fixação biológica de nitrogênio no feijoeiro-comum

A FBN surgiu como uma alternativa de grande relevância na otimização da produção de grãos, na década de 80, com pesquisas concentradas na cultura da soja (Embrapa, 2020). No feijão-comum, a simbiose com bactérias diazotróficas tem sido alvo de pesquisas, constituindo ser uma característica marcante na busca por uma agricultura cada vez mais sustentável. Esses microrganismos diazotróficos, no que

lhe concerne, fixam o N_2 nos nódulos radiculares, tornando o disponível à planta hospedeira (Chekanai *et al.*, 2018).

Após o estabelecimento da relação simbiótica entre planta e a bactéria, os processos desencadeados a partir daí são totalmente mutualísticos. O rizóbio, neste sistema de simbiose, utiliza os carboidratos provenientes da fotossíntese da planta hospedeira para sua manutenção e, conseqüentemente, promove o processo de FBN, beneficiando a planta com o N fixado em uma forma assimilável (Barros *et al.*, 2013). A quantidade de N exportado por tonelada de grãos produzidas pelo feijão-comum pode ser suprida, em parte, por meio da FBN, a qual contribui, em média, com até 40% do N exigido nutricionalmente pela cultura (Rabelo *et al.*, 2017; Brito *et al.*, 2011; Raposeiras *et al.*, 2006).

Diferentemente da soja, onde a inoculação com bactérias fixadoras é a principal fonte de N para a cultura em sistemas altamente tecnificados, no feijoeiro-comum a eficiência desta técnica ainda é discutida e é comum que os produtores, na grande maioria, utilizem como principal fonte de N os fertilizantes nitrogenados (Brito *et al.*, 2015). Esse fato se dá, principalmente, pela promiscuidade do feijoeiro à simbiose com uma ampla gama de rizóbios nativos, que por serem mais competitivos pelo sítio de infecção da rizosfera e menos eficiente na FBN que as estirpes de *Rhizobium* selecionadas, inviabiliza o processo FBN no feijoeiro-comum (Mwenda *et al.*, 2023; Sousa *et al.*, 2022a; Shamseldin e Velázquez, 2020).

No entanto, altas produtividades do feijoeiro-comum têm sido obtidas quando este é submetido à inoculação de estirpes de rizóbio mais eficientes e competitivas, com substituição parcial do N mineral. Com a inoculação de rizóbio exclusivamente na semeadura e adubação com 40 kg ha⁻¹ aos 25 dias após a emergência (DAE), Barros *et al.* (2016) obtiveram a mesma produtividade das plantas fertilizadas com N na semeadura e aos 25 DAE (20 kg ha⁻¹ e 40 kg ha⁻¹, respectivamente). Estes autores, assim como outros que realizaram estudos e relataram a resposta positiva do feijoeiro-comum submetido à inoculação com *R. tropici* (Chaves *et al.* 2018; Oliveira *et al.*, 2017; Barros *et al.* 2013; Oliveira e Sbardelotto, 2011), têm em comum a busca por encorajar produtores e afins, a adotarem o uso de inoculantes no sistema agrícola com o objetivo de otimizar a produtividade de grãos do feijoeiro de uma forma ambientalmente sustentável.

Pacheco *et al.* (2020) trouxeram em seu trabalho uma discussão acerca da contribuição da FBN para o desempenho produtivo de cultivares de feijão com

diferentes hábitos e ciclos de crescimento. Os autores mencionados evidenciaram que a adubação mineral de 90 kg ha⁻¹ e a inoculação com *Rhizobium* (estirpes SEMIA 4077, SEMIA 4080 e SEMIA 4088) apresentaram resultados semelhantes (sem diferença estatística) na produtividade de grãos das cultivares Ouro Negro, Jalo Precoce, BRS Estilo, BRS Grafite, BRS Pontal e BRS Vereda. Já nas cultivares BRS Radiante e BRS Marfim, a adubação mineral foi mais eficiente e com resultados para produtividade superior a inoculação rizobial.

Outro estudo, realizado por Oliveira et al. (2022), relata que a adubação nitrogenada pode ser substituída totalmente pela inoculação com *R. tropici* na cv. BRSMG Uai, a qual apresenta características de alta produtividade e porte ereto. O trabalho em questão realizou experimentos de campo para avaliar a eficiência da FBN na cv. BRSMG Uai e compará-la com a eficiência de outros materiais genéticos amplamente cultivados em todo o Brasil (BRSMG Madrepérola e Pérola). Os autores constataram que a cv. BRSMG Uai foi mais responsiva a inoculação com *Rhizobium*, em comparação aos outros materiais, e a produtividade foi 200 kg ha⁻¹ superior à adubação mineral com 80 kg ha⁻¹. Isto demonstra que diferentes cultivares a depender do seu ciclo e hábito de crescimento, podem responder de formas diferentes a inoculação rizobial e/ou a adubação mineral.

Em síntese, no intuito de resumir os efeitos/eficiência da inoculação com *Rhizobium* comparada à fertilização nitrogenada, Sousa et al. (2022a) realizaram uma meta-análise global com 68 estudos para identificar os principais fatores que afetam a FBN na cultura do feijão-comum. Evidenciaram que a inoculação com rizóbios foi mais eficiente em aumentar a produtividade do feijoeiro quando este foi cultivado na estação da seca, em sistema plantio direto e em solos com alto teor de matéria orgânica. Além disso, a redução da adubação nitrogenada nos sistemas de cultivo do feijoeiro pode ser favorecida pelo uso mais intenso da inoculação com *Rhizobium*, especialmente para as seguintes características de solo: solos com textura argilosa; solos eutróficos (saturação de bases maior que 50%); solos com acidez neutra a levemente ácido; e solos com disponibilidade adequada de P.

Ainda utilizando como base o estudo de meta-análise supramencionado, os autores revelaram que a inoculação com rizóbio aumentou a produtividade de grãos em 33%, mas não na mesma proporção que a adubação nitrogenada, que foi de 47%. Mesmo assim, o aumento da produtividade de grãos de feijão-comum na presença da inoculação com *Rhizobium*, em relação ao tratamento controle (sem inoculação ou

adubação nitrogenada mineral), pode garantir o sucesso da cultura em sistemas agrícolas de pequeno porte, onde os agricultores dependem totalmente desse insumo biológico. Essa conclusão é uma das principais contribuições da meta-análise em questão e demonstra que a FBN no feijoeiro é um processo complexo e dependente de vários fatores envolvidos, tais quais são determinantes para o sucesso da FBN na cultura.

2.4 Formas de inoculação e reinoculação de rizóbio

A inoculação de leguminosas é uma maneira eficiente de introduzir rizóbios eficazes no solo e, subsequentemente, na rizosfera das plantas. Tais inoculantes rizobianos contribuem para aumentar a contribuição da FBN e, conseqüentemente, a produtividade das culturas agrícolas (Deaker *et al.*, 2004; Catroux *et al.*, 2001). A aplicação do inoculante varia de acordo com sua forma. O inoculante líquido, por exemplo, pode ser aplicado via semente, sulco de semeadura e via cobertura, enquanto o inoculante à base de turfa só pode ser aplicado via semente (Hungria *et al.*, 2007).

Quanto à aplicação do inoculante rizobial em cobertura de pós-emergência, também conhecida como reinoculação ou inoculação suplementar, é uma alternativa que visa superar o declínio da FBN ao longo do ciclo da cultura. O que em tese promoveria uma nova população de nódulos que se mantenham ativos após o florescimento e fixando o N₂. Tal prática consiste na pulverização do inoculante direcionado ao solo, após a implantação da cultura (inoculação em cobertura), suplementando a inoculação feita no ato da semeadura (inoculação via semente) (Martins *et al.*, 2024; Sousa *et al.*, 2022b; Moretti *et al.*, 2018).

A aplicação suplementar de *Rhizobium* em cobertura geralmente é feita durante os estágios iniciais de crescimento, para garantir que as bactérias tenham tempo suficiente para estabelecer simbiose com as raízes das plantas. É importante seguir as recomendações específicas de inoculação e dosagem para cada tipo de leguminosa e considerar fatores como condições climáticas e qualidade do solo para otimizar os resultados da FBN (Martins *et al.*, 2024; Sousa *et al.*, 2022b; Moretti *et al.*, 2018).

Vale ressaltar que está “reinoculação” não se trata do termo utilizado para descrever a inoculação numa área na qual já foi realizada uma inoculação prévia no

ano agrícola anterior e, portanto, já possui no solo uma população estabelecida de bactérias no ano agrícola seguinte (Sousa *et al.*, 2022b; Hungria *et al.*, 2012). Tal reinoculação consiste na aplicação complementar do inóculo em lavouras que já receberam inoculação por ocasião da semeadura, ou seja, inóculo na semente mais complementação do inóculo em pós-emergência (dentro de um mesmo ano agrícola) (Martins *et al.*, 2024).

Diante dos possíveis benefícios que a prática de reinoculação pode proporcionar para os sistemas de cultivos com leguminosas, alguns trabalhos de pesquisas têm sido realizados para validar tais hipóteses. Entre os anos de 2014 a 2016, Moretti *et al.* (2018) realizaram dois experimentos de campo e relataram um aumento significativo da nodulação das plantas de soja, quando estas foram submetidas à reinoculação complementar em pós-emergência. Os autores verificaram também que, as pulverizações complementares do *Bradyrhizobium* em diferentes estádios de desenvolvimento da soja (V₁, V₃, V₆, R₁ e R₃), resultaram em aumentos adicionais de 12, 13, 11, 7 e 6% na produtividade de grãos, respectivamente, em comparação com o tratamento controle (fertilizado com N mineral), mas em apenas um dos dois anos aumentou a produtividade em comparação com o tratamento inoculado apenas vias semente.

Na cultura do feijão-comum, Sousa *et al.* (2022b) realizaram um experimento de campo na safra “das águas” no cerrado goiano e relataram que a inoculação via semente combinada com a reinoculação suplementar em pós-emergência, aumentou em 2.827 kg ha⁻¹ a produtividade de grãos do feijão da cv. BRS Valente, em relação à adubação nitrogenada mineral (40 kg ha⁻¹). Ainda corroborando com estes resultados, Teixeira *et al.* (2022) conduziram na mesma época e local um experimento testando doses da reinoculação na produtividade de grãos, onde foi constatado que a dose de 257 mL ha⁻¹ do inoculante rizobiano aplicado em cobertura no estágio V4 e suplementando a inoculação feita na semente, proporcionou maiores produtividades do feijoeiro-comum sem a adubação mineral.

Almeida *et al.* (2022) reportaram que a reinoculação com *R. tropici* na dose 2,5 vezes a dose de referência (375 L ha⁻¹), combinada com a co-inoculação com *Azospirillum brasilense* na dose de 100 L ha⁻¹, no estágio V4, resultou em maior produtividade de grãos da cv. de feijão BRS Esteio, o que significou produtividade de grãos semelhante àquela encontrada com aplicação de fertilizante N mineral. Mesmo diante destes trabalhos sobre o uso da reinoculação em cobertura, demonstrando o

potencial desta técnica para aumentar a produtividade de grãos, são necessários estudos mais aprofundados sobre esse assunto, a fim de validar tal prática e sua eficiência nos sistemas agrícolas brasileiros.

Portanto, se a inoculação via semente, prática essa já bastante consolidada, está sujeita aos intemperes do ambiente, a inoculação em cobertura está ainda mais susceptível aos fatores ambientais. Isso porque a aplicação do inoculante em cobertura pode expor a bactéria as altas temperaturas e condições de seca, quando comparamos com a inoculação via semente, o que pode levar à uma maior mortalidade destas bactérias no solo e, conseqüentemente, o insucesso da prática.

Ou seja, para que haja uma eficiência da reinoculação em cobertura, fazendo com que as células das bactérias penetrem no solo e consigam firmar a simbiose com a planta hospedeira, alguns pontos devem ser considerados. Primeiro, a aplicação deste inoculante precisa ser feito nas horas mais frescas do dia, de preferência no início da manhã ou final do dia, visando driblar as altas temperaturas que podem vir ocorrer. O jato da aplicação precisa ser direcionado ao colo da planta, ou pelo menos, o mais próximo possível, para que assim as bactérias penetrem o solo e entrem em contato com o sistema radicular da planta. E por último, em sistemas mais tecnificados que fazem uso da irrigação, é um diferencial realizar a aplicação do inóculo momentos antes da irrigação, para que a água da irrigação funcione como um veículo de transporte das bactérias inoculadas até as raízes.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Foi conduzido um experimento em casa de vegetação e quatro experimentos em campo, para investigar a resposta de cultivares de feijão-comum, com diferentes hábitos de crescimento e ciclos, à reinoculação adicional de *R. tropici* pulverizado em pós-emergência.

O experimento em casa de vegetação foi conduzido de novembro de 2021 a janeiro de 2022, no Departamento de Produção Vegetal da Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA) – UNESP, campus de Botucatu-SP, localizado na Fazenda Experimental Lageado (22° 51' S; 48° 25' W e altitude de 780). Nesse primeiro estudo foram investigadas as doses do inoculante aplicado via cobertura em pós-emergência da cultura.

Os experimentos de campo, foram conduzidos dois na Fazenda Experimental São Manuel (FCA-UNESP), no município de São Manuel-SP (25° 51' S; 48° 34' W e altitude de 709 m), de março a julho e de agosto a novembro de 2022 (São Manuel I e II), e outros dois experimentos na Fazenda Experimental Lageado (FCA-UNESP) (22° 51' S; 48° 26' W e altitude de 780 m), no município de Botucatu-SP, de setembro a dezembro de 2022 e de março a junho de 2023 (Botucatu I e II).

3.1 Caracterização das cultivares

Foram utilizadas três cultivares de feijão-comum com grãos tipo carioca, alto potencial produtivo e diferentes hábitos de crescimento/ciclo, sendo elas: IPR Andorinha, IPR Campos Gerais e TAA Dama, todas do grupo carioca.

A cv. IPR Andorinha tem ciclo precoce e alto potencial produtivo. Suas principais características são: porte semiereto, hábito de crescimento determinado tipo I, comprimento da guia de curto a médio, ciclo de 73 dias da emergência à maturação de colheita e peso médio de 100 grãos de 27 g (Iapar, 2013).

A cv. IPR Campo Gerais apresenta características básicas essenciais, tais como: hábito de crescimento indeterminado tipo II; porte ereto (favorece a colheita mecânica direta); ciclo médio de 88 dias (da emergência à colheita); potencial de produtividade em torno de 3.987 kg ha⁻¹ e peso médio de 100 grãos de 24 g (Iapar, 2011).

A cv. TAA Dama, por sua vez, possui ampla distribuição de cultivo nas principais regiões produtoras de feijão-comum. Suas principais características são: ciclo médio de 85 a 95 dias, hábito de crescimento indeterminado do tipo III (porte prostrado), peso

médio de 100 grãos de 28 g. Possui tolerância à seca e as perdas de grãos na colheita sob altos regimes pluviométricos (Gonçalves, 2022).

3.2 Experimento de casa de vegetação

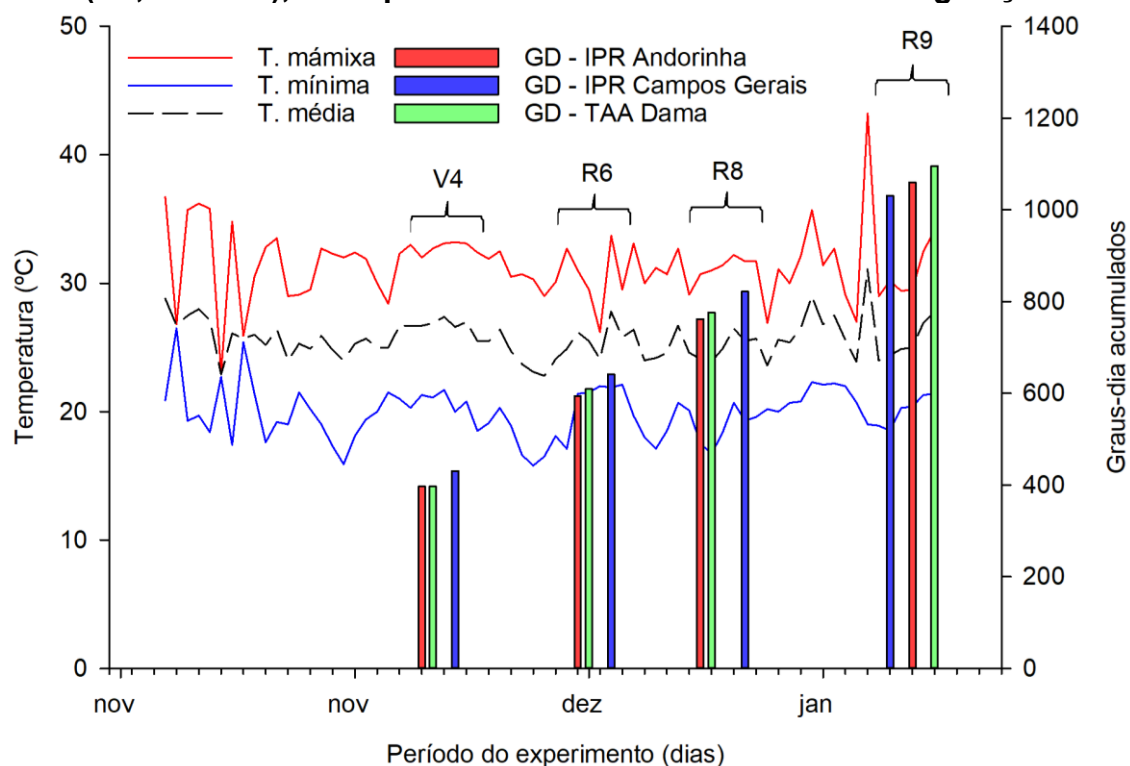
3.2.1 Caracterização das condições experimentais

A casa de vegetação utilizada no presente estudo contava com sistema de exaustão e sistema de umidificação para controle de temperatura do ar e umidade relativa. Realizou-se o monitoramento da temperatura no interior da casa de vegetação com auxílio de um termômetro de máxima e mínima e os registros foram realizados diariamente sempre no mesmo horário.

Foram definidos os estádios fenológicos das cultivares de feijão-comum por meio da determinação dos graus-dia (GD). O cálculo de GD foi determinado pelo método proposto por Ometto (1981), o qual, além de considerar a temperatura basal inferior (T_b), considera também a temperatura basal superior (TB). Renato et al. (2013) declararam que, o método de Ometto (1981) é o mais indicado para determinação do GD na cultura do feijão-comum, principalmente, em cenários de mudanças climáticas que projetam maiores incrementos da temperatura do ar.

Na Figura 1 são apresentadas as variações da temperatura do ar (máxima, mínima e média) registradas diariamente no interior da casa de vegetação. São apresentados também os GD para os estádios fenológicos V4, R6, R8 e R9 das cultivares de feijão-comum.

Figura 1 – Temperaturas máximas, mínimas e médias do ar diárias e valores de graus-dia (GD) acumulados ao longo do ciclo das cultivares de feijão-comum para os estádios fenológicos de desenvolvimento vegetativo (V4) e reprodutivo (R6, R8 e R9), no experimento conduzido em casa de vegetação



Foi utilizado, como substrato, uma porção de solo do tipo Latossolo Vermelho distrófico (Embrapa, 2013) coletado na área experimental pertencente à Fazenda Lageado (FCA-UNESP). Antes da instalação do experimento, uma amostra foi coletada para determinação das características químicas (Raij *et al.*, 2001) e granulométricas (Embrapa, 1997), cujos resultados são apresentados na Tabela 1.

Com o intuito de evitar a interferência/competição dos possíveis rizóbios nativos do solo, a profundidade da coleta foi realizada na parte inferior à 1 m de profundidade (subsuperficial), considerando que nessa camada as populações de *Rhizobium* nativas tendem a diminuir (Rupela *et al.*, 1987). Antes da instalação do experimento, uma amostra do solo foi coletada, secada ao ar, destorroada, homogeneizada, passadas em peneira com malha de abertura de 2 mm e encaminhada para análise químicas e contagem de células pelo número mais provável (NMP). O método NMP foi realizado no Laboratório de Biotecnologia do Solo da Embrapa Soja, onde foram realizadas a contagem de células que consistiu na inoculação de diluições seriadas das amostras, em plantas testes específicas (feijão), cultivadas em condições assépticas, avaliando-se a formação de nódulos (Hungria e Araujo, 1994). O resultado

revelou população indetectável de bactérias no solo ($< 10^2$ UFC g⁻¹ de solo) pelo método utilizado (NMP), o que possibilitou verificar os reais efeitos dos tratamentos de inoculação e reinoculação propostos.

Tabela 1 – Atributos químicos e granulométricos do solo utilizado no experimento em condições de casa de vegetação

pH(CaCl ₂)	MO	P _(resina)	S-SO ₄ ²⁻	H+Al	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CTC	V
	g dm ⁻³	mg dm ⁻³			mmol _c dm ⁻³				%
4,2	9	1	6	42	0,16	3	1	46	8
B	Cu	Fe	Mn	Zn	Areia	Silte	Argila		
		mg dm ⁻³				g kg ⁻¹			
0,09	0,1	4	0,6	0,1	854	26	120		

pH = potencial hidrogeniônico; MO = matéria orgânica; P_(resina) = fósforo disponível; S-SO₄²⁻ = enxofre na forma de sulfato; K⁺ = potássio trocável; Ca²⁺ = cálcio trocável; Mg²⁺ = magnésio trocável; H+Al = hidrogênio + alumínio; CTC = capacidade de troca catiônica; V = saturação por bases; B = boro; Cu = cobre; Fe = ferro; Mn = manganês; Zn = zinco.

3.2.2 Delineamento e condução do experimento

No experimento de casa de vegetação, o delineamento utilizado foi o de blocos casualizados, em esquema fatorial 3 × 6, com nove repetições. Os tratamentos foram constituídos pelas combinações de três cultivares de feijão-comum (IPR Andorinha, IPR Campos Gerais e TAA Dama), submetidas a seis formas para fornecimento de N (Tabela 2).

Tabela 2 – Tratamentos aplicados em três cultivares de feijão-comum (IPR Andorinha, IPR Campos Gerais e TAA Dama) em condições de casa de vegetação

Tratamento	Descrição	Dose do inoculante turfoso via semente	Dose do inoculante líquido (reinoculação)	Dose da fertilização nitrogenada
T1	Controle (ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada)	-	-	-
T2	Inoculação exclusivamente nas sementes	4 g kg ⁻¹ de semente	-	-
T3	Inoculação via semente + reinoculação em pós-emergência	4 g kg ⁻¹ de semente	400 mL ha ⁻¹ (2,9 × 10 ⁶ células por planta)	-
T4	Inoculação via semente + reinoculação em pós-emergência	4 g kg ⁻¹ de semente	800 mL ha ⁻¹ (5,9 × 10 ⁶ células por planta)	-
T5	Inoculação via semente + reinoculação em pós-emergência	4 g kg ⁻¹ de semente	1200 mL ha ⁻¹ (8,9 × 10 ⁶ células por planta)	-
T6	Fertilização nitrogenada	-	-	120 kg ha ⁻¹ de N mineral (40 e 80 kg ha ⁻¹ na semeadura e cobertura, respectivamente)

Cada parcela experimental foi composta por um vaso de polietileno, com capacidade para 12 L de solo, contendo duas plantas cada. O solo foi corrigido e adubado com P, K e micronutrientes, seguindo as recomendações de Raij et al. (1997). Utilizou-se calcário dolomítico (PRNT 90%) para elevar a saturação por bases a 70%, o qual foi incorporado ao solo e permaneceu incubando por 30 dias. Após a incubação, os macros e micronutrientes foram incorporados ao solo antes da semeadura, em todas as parcelas experimentais, nas seguintes doses: 100 mg dm⁻³ de P₂O₅ e 250 mg dm⁻³ de K₂O, na forma de superfosfato simples e cloreto de potássio, respectivamente; e 25 mg dm⁻³ de FTE BR 12 contendo uma mistura de micronutrientes (S – 3%, B – 1,8%, Mn – 2%, Zn – 9%, 0,8% – Cu e 0,1% – Mo). A adubação nitrogenada com 20 e 40 mg dm⁻³ (equivalente a 40 e 80 kg ha⁻¹ na semeadura e cobertura, respectivamente) foi realizada apenas no tratamento T6 e foi utilizada como fonte a ureia (46% N).

Dois dias antes da semeadura, as sementes foram tratadas com inseticida e fungicida de ação protetora (piraclostrobina; tiofanato metílico; fipronil) na dose de 200 mL do produto comercial (p.c.) 100^{-1} kg de sementes. O inoculante sólido turfoso comercial GRAP NOD® foi utilizado em todos os tratamentos que receberam inoculação via semente. O referido inoculante é formulado com a bactéria *R. tropici* (estirpes SEMIA 4077 e SEMIA 4080), com garantia de 2×10^9 UFC g⁻¹ do produto. As sementes foram inoculadas com a dose de 200 g para cada 50 kg de sementes, misturando-se bem o inoculante a uma solução açucarada (100 g de açúcar cristal dissolvido em 1 L de água potável), cerca de 2 horas antes da semeadura, conforme a recomendação do fabricante.

No dia 06/11/2021, foram semeadas seis sementes de feijão-comum por vaso, distribuídas em forma de círculo na parte central de cada vaso. Aos 10 dias após a emergência das plântulas (20/11/2021), foi realizado o desbaste, deixando-se duas plantas por vaso. O fornecimento de cobalto ($2,12 \times 10^{-5}$ g vaso⁻¹) e molibdênio ($2,12 \times 10^{-4}$ g vaso⁻¹) foi feito via aplicação foliar, utilizando pulverizador costal pressurizado por CO₂, quando as plantas alcançaram o estágio V4.

Na reinoculação em pós-emergência, foi utilizado inoculante líquido contendo as mesmas estirpes do inoculante turfoso comercial GRAP NOD®, cujo inoculante foi preparado e disponibilizado pelo Laboratório de Biotecnologia do Solo da Embrapa Soja. As doses da reinoculação foram definidas considerando uma população média de 267 mil plantas ha⁻¹. As pulverizações do inóculo em pós-emergência (reinoculação) foi realizado em volume de calda de 200 L ha⁻¹, no estágio fenológico de desenvolvimento do feijão-comum V4 (quinta folha trifoliolada totalmente expandida). O volume de inoculante líquido pulverizado em pós-emergência foi de 0,003 mL vaso⁻¹ no T3; 0,006 mL vaso⁻¹ no T4; e 0,009 mL vaso⁻¹ no T5. Foi utilizada uma pipeta graduada para medição e transferência dos volumes calculados. O volume de calda aplicado foi de 1,5 mL vaso⁻¹. No momento da pulverização, utilizou-se um pulverizador costal pressurizado por CO₂ para aplicações da reinoculação, sendo estas realizadas no final da tarde, visando um período de temperaturas mais amenas, e com o jato direcionado para o colo da planta. Para que fosse possível aplicar as quantidades exatas do inoculante líquido, o volume de calda calculado foi ajustado para 1 (um) litro e fez-se a regulagem do pulverizador costal pressurizado por CO₂ para que fosse pulverizado a quantidade exata de calda por vaso (1,5 mL).

No manejo fitossanitário, foi utilizado inseticida (imidacloprido; bifentrina) na dose de 350 mL do p.c. ha⁻¹ em volume de calda de 200 L ha⁻¹, recomendado para mosca branca (*Bemisia tabaci*) e vaquinha (*Diabrotica speciosa*). A irrigação foi realizada com base na saturação do solo envasado, seguindo os critérios para determinação da capacidade de vaso (Casaroli e Lier, 2008), em que foram adicionados volumes conhecidos de água até a saturação do solo, e com base neste volume de água foi fornecido regas manuais diariamente com o intuito de manter o solo a 80% da capacidade máxima de armazenamento de água (Pelá *et al.*, 2009).

3.2.3 Avaliações realizadas em casa de vegetação

3.2.3.1 Índice relativo de clorofila

Quando as cultivares de feijão-comum atingiram os estádios fenológicos R6 (florescimento pleno) e R8 (início do enchimento das vagens), foram realizadas leituras indiretas do índice relativo de clorofila (IRC), com o aparelho SPAD-502. As determinações do IRC foram feitas no período da manhã (8:00-10:00h), sombreando o aparelho com o corpo para evitar interferência da luz solar. Em cada estágio foram realizadas leituras em duas plantas nas seis repetições de cada tratamento, sendo realizadas três leituras por trifólio de cada folha amostrada.

Considerou-se como folha diagnóstica, além da terceira folha trifoliolada completamente expandida a partir do ápice, o trifólio mais baixeiro da planta. As leituras foram realizadas em todo o limbo, exceto nervuras, somando, assim, 36 leituras por tratamento de cada trifólio amostrado. Os resultados foram expressos como o IRC do trifólio velho (IRC_Tvelho) e do trifólio novo (IRC_Tnovo).

3.2.3.2 Nodulação

Nos estádios fenológicos R6 e R8, três repetições foram amostradas em cada estágio para avaliação das variáveis de nodulação. As raízes foram lavadas cuidadosamente com água para retirada do solo adjacente às raízes, com posterior separação e contagem total dos nódulos, para determinação do número de nódulos por planta (NN).

Todos os nódulos amostrados foram acondicionados em recipientes adequados e levados à estufa de circulação forçada a 60 °C por 48 horas, com posterior pesagem

do material seco em balança de precisão, para determinação da matéria seca de nódulos por planta (MSN). Com base nesses resultados, foi calculada a razão entre a MSN e o NN, para obtenção da matéria seca por nódulo (MSPN) (Moreira *et al.*, 2017).

3.2.3.3 *Matéria seca de raízes e parte aérea*

As mesmas plantas amostradas nos estádios fenológicos R6 e R8 (citadas no subitem anterior) foram divididas em raízes e parte aérea (caules, folhas e estruturas reprodutivas). Posteriormente, esse material foi acondicionado em sacos de papel, devidamente identificados conforme os tratamentos, e foram submetidos à secagem em estufa de circulação forçada a 60 °C por 72 horas. Em seguida, as amostras secas foram pesadas em balança analítica para determinação da matéria seca radicular (MSR) e matéria seca da parte aérea (MSPA), com os resultados expressos em g planta⁻¹.

3.2.3.4 *Teor e quantidade acumulado de N na parte aérea*

Os materiais utilizados para determinação da MSPA nos estádios R6 e R8, foram moídos em moinho tipo Willey e armazenados em sacos de papel devidamente identificados, para posterior análise química para determinação do teor de N (TN) na parte aérea e expressos em g kg⁻¹. Foi utilizada a metodologia da digestão sulfúrica, seguida da destilação e titulação (método Kjeldahl) (Malavolta *et al.*, 1997). Posteriormente, foi calculada a quantidade de N total acumulado na parte aérea (NAPA mg planta⁻¹), resultante do produto de MSPA × TN / 1000 (Brito *et al.*, 2011).

3.2.3.5 *Componentes agronômicos*

Quando as plantas atingiram o estágio R₉, foram colhidas todas as parcelas experimentais restantes (três repetições) para determinação do número de vagens por planta (NVP), o número de grãos por vagem (NGV), a massa de 100 grãos (M100G) e a massa de grãos por planta (MGP). Os dados obtidos para M100G e MGP foram transformados para 13% de umidade (base úmida) e expresso em g planta⁻¹.

3.3 Experimento de campo

3.3.1 Localização e caracterização das áreas experimentais

Na ocasião, investigou-se a eficiência das diferentes formas para fornecimento de N, incluindo a inoculação adicional de *R. tropici* pulverizado em pós-emergência na dose determinada no experimento de casa de vegetação. Nos experimentos conduzidos em São Manuel utilizou-se apenas a cv. TAA Dama. Nos experimentos de Botucatu foram utilizadas as três cultivares utilizadas no estudo em casa de vegetação (IPR Andorinha, IPR Campos Gerais e TAA Dama).

Segundo a classificação de Köppen, o clima predominante em São Manuel é do tipo Cfa, que se caracteriza pelo clima temperado quente (mesotérmico) úmido, e a temperatura média do mês mais quente é superior a 22 °C. Em Botucatu, o clima predominante é do tipo Cwa (subtropical úmido), que se caracteriza por verão quente e chuvoso (temperaturas superiores a 22 °C) e inverno seco (temperaturas inferiores a 18 °C) (Cunha e Martins, 2009). Os dados climáticos registrados durante a condução dos experimentos de campo estão apresentados nas Figuras 2 e 3.

Antes da instalação de cada um dos experimentos, foram coletadas amostras de solo na camada de 0 a 0,20 m de profundidade para determinação das características químicas (Raij *et al.*, 2001) e granulométricas (Embrapa, 1997), cujos resultados estão apresentados na Tabela 3. Conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2013), o solo da área experimental de São Manuel foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico, já o da área experimental de Botucatu, o solo foi classificado como Nitossolo Vermelho distroférrico.

Figura 2 – Temperaturas máxima e mínima, precipitação e irrigação diárias registradas nas áreas experimentais em São Manuel (I e II), São Paulo, Brasil, durante os períodos de março a julho de 2022 (A) e de agosto a novembro de 2022 (B)

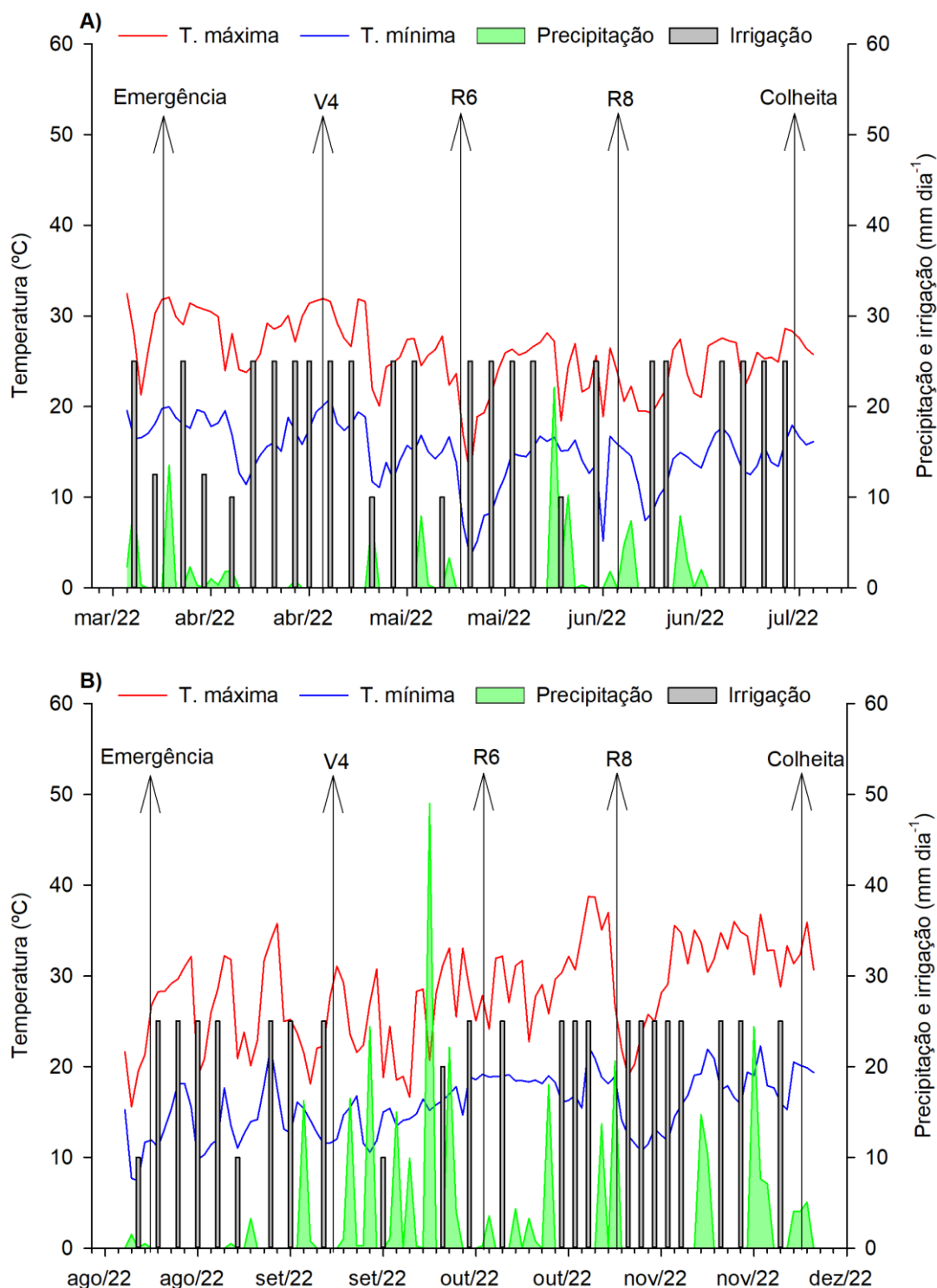


Figura 3 – Temperaturas máxima e mínima, precipitação e irrigação diárias registradas nas áreas experimentais em Botucatu (I e II), São Paulo, Brasil, de setembro a dezembro de 2022 (A) e de março a junho de 2023 (B)

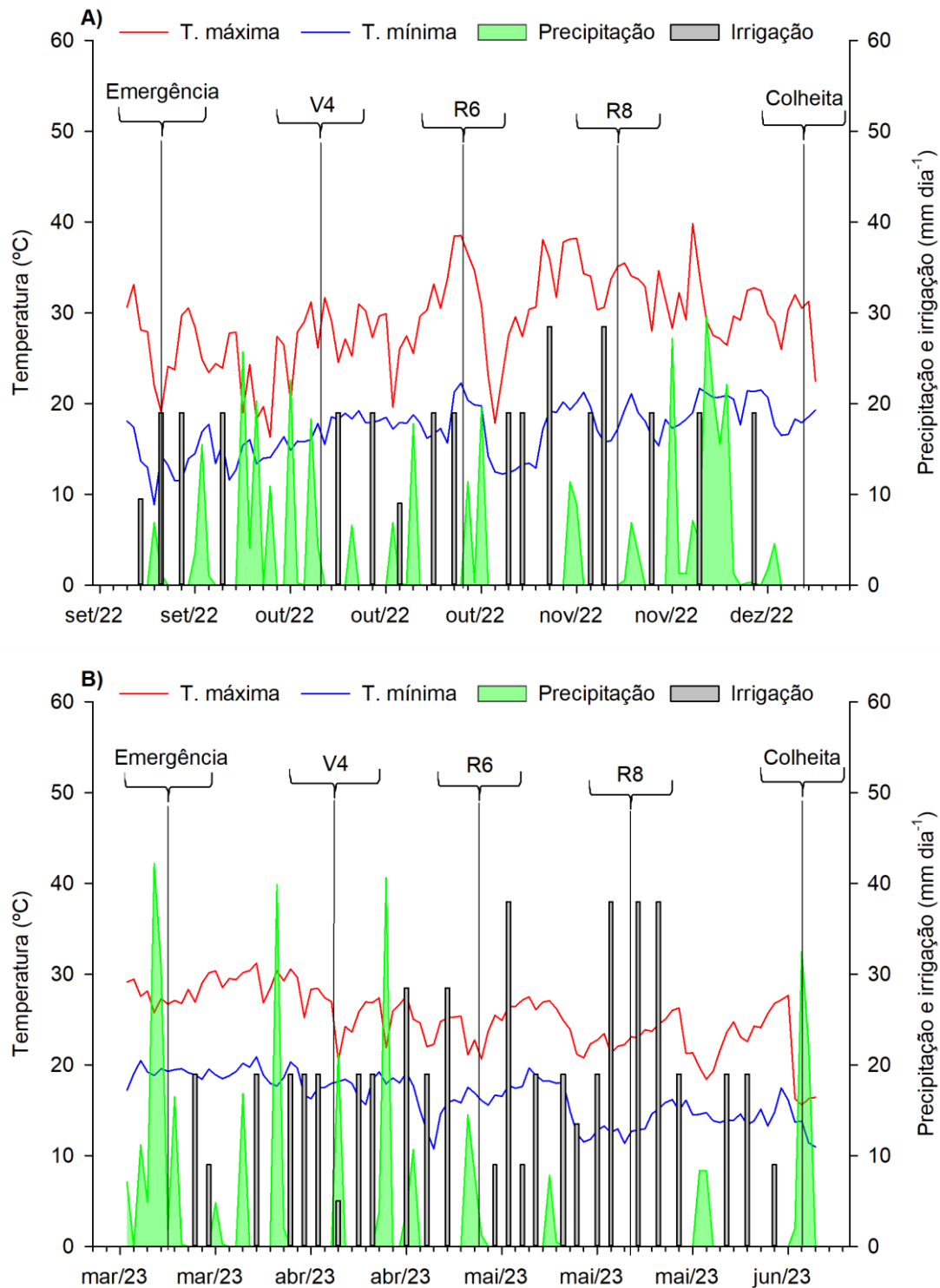


Tabela 3 – Atributos químicos e granulométricos dos solos utilizados nos experimentos em condições de campo

Experimentos	pH(CaCl ₂)	MO	P _(resina)	S-SO ₄ ²⁻	H+Al	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CTC	V
		g dm ⁻³	— mg dm ⁻³ —				mmol _c dm ⁻³			%
São Manuel I	4,8	8	6	6	18	1,8	9	4	33	45
São Manuel II	6,1	12	91	9	16	0,7	9	2	28	42
Botucatu I	5,1	25	17	9	39	8,4	36	13	95	60
Botucatu II	5,1	29	30	23	37	5,0	32	13	87	57
Experimentos	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Areia	Silte	Argila		
		mg dm ⁻³				g dm ⁻³				
São Manuel I	0,08	2,1	16	3,2	0,9	819	124	57		
São Manuel II	0,12	1,5	21	8,6	1,3	812	120	68		
Botucatu I	0,33	10,7	23	19,5	1,3	268	186	546		
Botucatu II	0,25	10,7	27	28,5	2,4	265	188	547		

pH = potencial hidrogeniônico; MO = matéria orgânica; P_(resina) = fósforo disponível; S-SO₄²⁻ = enxofre na forma de sulfato; H+Al = hidrogênio + alumínio; K⁺ = potássio trocável; Ca²⁺ = cálcio trocável; Mg²⁺ = magnésio trocável; V = saturação por bases; B = boro; Cu = cobre; Fe = ferro; Mn = manganês; Zn = zinco.

3.3.2 Delineamento experimental e tratamentos

Os experimentos conduzidos em São Manuel seguiram um delineamento de blocos casualizados com cinco tratamentos (formas para fornecimento de N) e quatro repetições (Tabela 4). A cv. TAA Dama foi utilizada nos experimentos conduzidos em São Manuel. Já os experimentos conduzidos em Botucatu seguiram um delineamento de blocos casualizados, em esquema fatorial 3 × 5, com quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos pelas combinações de três cultivares de feijão-comum (IPR Andorinha, IPR Campos Gerais e TAA Dama), submetidos a cinco formas para fornecimento de N (Tabela 4).

Tabela 4 – Tratamentos (formas para fornecimento de N) aplicados nos experimentos em condições de campo

Tratamento	Descrição	Dose do inoculante turfoso via semente	Dose do inoculante líquido (reinoculação)	Dose da fertilização nitrogenada
T1	Controle (ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada)	-	-	-
T2	Inoculação exclusivamente nas sementes	4 g kg ⁻¹ de semente	-	-
T3	Inoculação via semente + reinoculação em pós-emergência	4 g kg ⁻¹ de semente	1200 mL ha ⁻¹ (8,9 × 10 ⁶ células por planta)	-
T4	Fertilização nitrogenada	-	-	60 kg ha ⁻¹ de N mineral (20 e 40 kg ha ⁻¹ na semeadura e cobertura, respectivamente)
T5	Fertilização nitrogenada	-	-	120 kg ha ⁻¹ de N mineral (40 e 80 kg ha ⁻¹ na semeadura e cobertura, respectivamente)

A dosagem do inoculante pulverizado em pós-emergência (reinoculação) no tratamento T3 dos experimentos de campo, foi definida com base nos resultados do estudo de casa de vegetação. A pulverização da reinoculação foi realizada em volume de calda de 200 L ha⁻¹, no estágio fenológico V4. As aplicações foram realizadas com o auxílio de um pulverizador costal pressurizado por CO₂, direcionando o jato ao colo das plantas, abaixo do dossel de folhas nas entrelinhas do feijão-comum.

Quando o tratamento incluía inoculação nas sementes, foi utilizado o inoculante sólido turfoso comercial GRAP NOD®. As sementes foram inoculadas com a dose de 200 g para cada 50 kg de sementes, conforme descrito anteriormente no estudo de casa de vegetação. Na reinoculação em pós-emergência, foi utilizado inoculante líquido contendo as mesmas estirpes do inoculante turfoso (SEMIA 4077 e SEMIA 4080), cujo inoculante foi preparado e disponibilizado pelo Laboratório de Biotecnologia do Solo da Embrapa Soja.

3.3.3 Instalação e condução dos experimentos

O sistema de cultivo utilizado foi o plantio direto em todos os experimentos. Em São Manuel, para a formação de palhada, semeou-se o milheto (*Pennisetum glaucum*) 98 dias antes da instalação do experimento I (22/12/21), enquanto no experimento II, o milho (*Zea mays*) foi cultivado antes do experimento. Em Botucatu, as áreas já estavam cultivadas com *Brachiaria ruziziensis* e, portanto, utilizou-se está para a cobertura morta do solo, em ambos os experimentos.

Em todos os experimentos, a dessecação das plantas presentes na área foi realizada com os herbicidas halossulfurom-metílico + sal de amônia de N, sendo está realizada pelo menos 15 dias antes da semeadura do feijão-comum. Quanto ao histórico das áreas, não havia registros de cultivo de leguminosas em todos os locais a pelo menos dois anos antes das instalações dos experimentos.

Em todos os locais onde foram realizados os experimentos de campo, as parcelas experimentais foram constituídas por oito fileiras de seis metros de comprimento, espaçadas em 0,45 m. Para as avaliações, foram consideradas às quatro linhas centrais, desprezando 0,5 m na extremidade de cada fileira de plantas e uma fileira de cada lado da parcela experimental.

No experimento São Manuel I, foi aplicado 627 kg ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT 88%) para elevar a saturação por bases a 70%, o qual foi incorporado ao solo 30 dias antes da semeadura do milheto. Em todos os experimentos de campo, as adubações de plantio com P e K seguiram as recomendações de Raij et al. (1997) e com base nos resultados das análises químicas dos solos (Tabela 3). As fontes utilizadas para P e K foram o superfosfato simples e o cloreto de potássio, respectivamente. As seguintes quantidades de adubos minerais foram aplicadas na semeadura: São Manuel I – 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 40 kg ha⁻¹ de K₂O; São Manuel II – 20 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 100 kg ha⁻¹ de K₂O (50 e 50 kg ha⁻¹ na semeadura e em cobertura, respectivamente); Botucatu I e II – 40 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 20 kg ha⁻¹ de K₂O. Em todas as condições experimentais, realizou-se a aplicação na semeadura de FTE BR 12 na dose de 50 kg ha⁻¹ e o fornecimento de cobalto (3,53 g ha⁻¹) e molibdênio (35,25 g ha⁻¹) via aplicação foliar no estágio V4.

Independentemente do tratamento, as sementes foram tratadas com inseticida e fungicida de ação protetora (piraclostrobina + tiofanato metílico + fipronil), dois dias antes da semeadura, na dose de 200 mL do produto comercial (p.c.) 100⁻¹ kg de

sementes. Foi realizada a semeadura direta das cultivares de feijão na densidade de 14 sementes por metro, seguindo a mesma densidade de semeadura utilizada por Leal et al. (2019), para as cultivares estudadas no presente estudo. As semeaduras foram realizadas nos dias 30/03/2022, 18/08/2022, 09/09/2022 e 07/03/2023, nos experimentos São Manuel I, São Manuel II, Botucatu I e Botucatu II, respectivamente. A emergência das plantas ocorreu com seis e sete dias após a semeadura (DAS) nos experimentos de São Manuel e Botucatu, respectivamente.

Os experimentos foram conduzidos sob irrigação por aspersão em todos os locais. O controle de plantas daninhas foi realizado através da associação do método químico e de capinas manuais durante o crescimento e desenvolvimento da cultura. Com relação ao controle de pragas e doenças, este foi feito através do monitoramento da cultura e produtos recomendados para o feijoeiro. Na Tabela 5 e 6 são detalhados os produtos utilizados no manejo fitossanitário dos experimentos de São Manuel e Botucatu, respectivamente.

A duração do ciclo, correspondente ao período entre a semeadura e a colheita, foi de 98 e 104 dias nos experimentos I e II de São Manuel, respectivamente. Em Botucatu, as durações dos ciclos de cada cultivar foram: Experimento I – IPR Andorinha e IPR Campos Gerais de 97 dias; TAA Dama 101 dias. Experimento II – 98 dias para as cultivares IPR Andorinha e IPR Campos Gerais; e 101 dias para a TAA Dama.

Tabela 5 – Tratamentos fitossanitários realizados na cultura do feijão-comum, em dois experimentos conduzidos em São Manuel

Data	Classe (nome comercial)	Ingrediente ativo (concentração)	Dose g i.a. ha ⁻¹
São Manuel I			
09/04/2022	Inseticida (Orthene 750 BR)	Acefato (750 g kg ⁻¹)	375
16/04/2022	Inseticida (Galil SC)	Imidacloprido (250 g L ⁻¹)	100
16/04/2022	Inseticida (Connect)	Imidacloprido (100 g L ⁻¹) Beta-ciflutrina (12,5 g L ⁻¹)	112,5
16/04/2022	Herbicida (Flex)	Fomesafem (250 g L ⁻¹)	250
16/04/2022	Herbicida (Basagran 600)	Bentazona (600 g L ⁻¹)	720
16/04/2022	Adjuvante (Assist)	Óleo mineral (756 g L ⁻¹)	756
21/04/2022	Inseticida (Connect)	Imidacloprido (100 g L ⁻¹) Beta-ciflutrina (12,5 g L ⁻¹)	112,5
21/04/2022	Inseticida (Orthene 750 BR)	Acefato (750 g kg ⁻¹)	375
03/05/2022	Inseticida (Connect)	Imidacloprido (100 g L ⁻¹) Beta-ciflutrina (12,5 g L ⁻¹)	112,5
03/05/2022	Herbicida (Flex)	Fomesafem (250 g L ⁻¹)	250
03/05/2022	Herbicida (Basagran 600)	Bentazona (600 g L ⁻¹)	720
03/05/2022	Adjuvante (Assist)	Óleo mineral (756 g L ⁻¹)	756
07/05/2022	Fungicida (Azimut)	Azoxistrobina (120 g L ⁻¹) Tebuconazol (200 g L ⁻¹)	192
07/05/2022	Inseticida (Mustang 350)	Zeta-cipermetrina (350 g L ⁻¹)	42
14/05/2022	Fungicida (Azimut)	Azoxistrobina (120 g L ⁻¹) Tebuconazol (200 g L ⁻¹)	192
14/05/2022	Inseticida (Mustang 350)	Zeta-cipermetrina (350 g L ⁻¹)	42
São Manuel II			
08/09/2022	Inseticida (Orthene 750 BR)	Acefato (750 g kg ⁻¹)	375
08/09/2022	Herbicida (Flex)	Fomesafem (250 g L ⁻¹)	250
08/09/2022	Herbicida (Fusilade 250 EW)	Fluasifope-p-butilico (250 g L ⁻¹) Destilados do petróleo (104 g L ⁻¹)	177
08/09/2022	Adjuvante (Assist)	Óleo mineral (756 g L ⁻¹)	756
23/09/2022	Inseticida (Orthene 750 BR)	Acefato (750 g kg ⁻¹)	375
23/09/2022	Fungicida (Azimut)	Azoxistrobina (120 g L ⁻¹) Tebuconazol (200 g L ⁻¹)	192
23/09/2022	Herbicida (Flex)	Fomesafem (250 g L ⁻¹)	250
23/09/2022	Herbicida (Fusilade 250 EW)	Fluasifop-p-butilico (250 g L ⁻¹) Destilados do petróleo (104 g L ⁻¹)	177
23/09/2022	Herbicida (Basagran 600)	Bentazona (600 g L ⁻¹)	720
23/09/2022	Adjuvante (Assist)	Óleo mineral (756 g L ⁻¹)	756
24/10/2022	Herbicida (Flex)	Fomesafem (250 g L ⁻¹)	250
24/10/2022	Herbicida (Fusilade 250 EW)	Fluasifop-p-butilico (250 g L ⁻¹) Destilados do petróleo (104 g L ⁻¹)	177
24/10/2022	Adjuvante (Assist)	Óleo mineral (756 g L ⁻¹)	756
24/10/2022	Fungicida (Azimut)	Azoxistrobina (120 g L ⁻¹) Tebuconazol (200 g L ⁻¹)	192
24/10/2022	Inseticida (Mustang 350)	Zeta-cipermetrina (350 g L ⁻¹)	42

i.a.: ingrediente ativo.

Tabela 6 – Tratamentos fitossanitários realizados na cultura do feijão-comum, em dois experimentos conduzidos em Botucatu

Data	Classe (nome comercial)	Ingrediente ativo (concentração)	Dose g i.a. ha ⁻¹
Botucatu I			
06/10/2022	Inseticida (Imidagold 700 WG)	Imidacloprido (700 g ka ⁻¹)	175
06/10/2022	Inseticida (Pyrinex 480 EC)	Clorpirifós (480 g L ⁻¹)	980
		Xilol (500 g L ⁻¹)	
06/10/2022	Herbicida (Flex)	Fomesafem (250 g L ⁻¹)	250
06/10/2022	Herbicida (Fusilade 250 EW)	Fluasifope-p-butílico (250 g L ⁻¹)	177
		Destilados do petróleo (104 g L ⁻¹)	
06/10/2022	Herbicida (Basagran 600)	Bentazona (600 g L ⁻¹)	720
06/10/2022	Adjuvante (Assist)	Óleo mineral (756 g L ⁻¹)	756
26/10/2022	Fungicida (Azimut)	Azoxistrobina (120 g L ⁻¹)	192
		Tebuconazol (200 g L ⁻¹)	
26/10/2022	Inseticida (Mustang 350)	Zeta-cipermetrina (350 g L ⁻¹)	42
26/10/2022	Herbicida (Select)	Cletodim (240 g L ⁻¹)	108
26/10/2022	Adjuvante (Agefix)	Óleo mineral (800 g L ⁻¹)	800
10/11/2022	Inseticida (Mustang 350)	Zeta-cipermetrina (350 g L ⁻¹)	42
10/11/2022	Inseticida (Intrepid 240)	Metoxifenoazida (240 g L ⁻¹)	24
10/11/2022	Fungicida (Azimut)	Azoxistrobina (120 g L ⁻¹)	192
		Tebuconazol (200 g L ⁻¹)	
10/11/2022	Adjuvante (Agefix)	Óleo mineral (800 g L ⁻¹)	800
17/11/2022	Inseticida (Mustang 350)	Zeta-cipermetrina (350 g L ⁻¹)	42
17/11/2022	Inseticida (Intrepid 240)	Metoxifenoazida (240 g L ⁻¹)	24
17/11/2022	Fungicida (Azimut)	Azoxistrobina (120 g L ⁻¹)	192
		Tebuconazol (200 g L ⁻¹)	
17/11/2022	Adjuvante (Agefix)	Óleo mineral (800 g L ⁻¹)	800
Botucatu II			
28/03/2023	Inseticida (Imidagold 700 WG)	Imidacloprido (700 g ka ⁻¹)	175
28/03/2023	Inseticida (Pyrinex 480 EC)	Clorpirifós (480 g L ⁻¹)	980
		Xilol (500 g L ⁻¹)	
28/03/2023	Herbicida (Select)	Cletodim (240 g L ⁻¹)	108
28/03/2023	Herbicida (Basagran 600)	Bentazona (600 g L ⁻¹)	720
28/03/2023	Adjuvante (Zom)	Óleo mineral (920 g L ⁻¹)	230
06/04/2023	Inseticida (Rapel)	Acefato (700 g L ⁻¹)	210
06/04/2023	Inseticida (Pyrinex 480 EC)	Clorpirifós (480 g L ⁻¹)	980
		Xilol (500 g L ⁻¹)	
06/04/2023	Herbicida (Daga)	Haloxifope (125 g L ⁻¹)	37,5
06/04/2023	Herbicida (Select)	Cletodim (240 g L ⁻¹)	108
28/03/2023	Herbicida (Basagran 600)	Bentazona (600 g L ⁻¹)	720
06/04/2023	Adjuvante (Zom)	Óleo mineral (920 g L ⁻¹)	230
20/04/2023	Fungicida (Orkestra)	Fluxapiraxade (167 g L ⁻¹) + Piraclostrobina (333 g L ⁻¹)	125
20/04/2023	Fungicida (Azimut)	Azoxistrobina (120 g L ⁻¹)	192
		Tebuconazol (200 g L ⁻¹)	
20/04/2023	Inseticida (Mustang 350)	Zeta-cipermetrina (350 g L ⁻¹)	42
20/04/2023	Inseticida (Intrepid 240)	Metoxifenoazida (240 g L ⁻¹)	24
20/04/2023	Adjuvante (Zom)	Óleo mineral (920 g L ⁻¹)	230
09/05/2023	Fungicida (Orkestra)	Fluxapiraxade (167 g L ⁻¹) + Piraclostrobina (333 g L ⁻¹)	125
09/05/2023	Fungicida (Azimut)	Azoxistrobina (120 g L ⁻¹)	192
		Tebuconazol (200 g L ⁻¹)	
09/05/2023	Inseticida (Mustang 350)	Zeta-cipermetrina (350 g L ⁻¹)	42
09/05/2023	Inseticida (Intrepid 240)	Metoxifenoazida (240 g L ⁻¹)	24
09/05/2023	Adjuvante (Zom)	Óleo mineral (920 g L ⁻¹)	230

i.a.: ingrediente ativo.

3.3.4 Avaliações realizadas em campo

3.3.4.1 *Índice relativo de clorofila*

Nos estádios fenológicos R6 e R8 das cultivares de feijão-comum, foram realizadas leituras indiretas do IRC, conforme descrito no subitem 3.2.3.1. Na ocasião, dez plantas foram amostradas por parcela experimental, sendo que, em cada planta foram realizadas três leituras por trifólio de cada folha, somando, assim, 30 leituras por parcela experimental de cada tratamento.

3.3.4.2 *Diagnose foliar*

No estágio R6 e R8, dez folhas do terço médio das plantas por parcela foram coletadas (Ambrosano *et al.*, 1997), secas em estufa a 60 °C por 72 horas e, em seguida, submetida à análise para determinação dos teores dos nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn), segundo os métodos descritos por Malavolta *et al.* (1997).

3.3.4.3 *Nodulação*

Nos estádios R6 e R8, foram coletadas cinco plantas por parcela experimental, com o auxílio de uma pá reta, sempre prezando pela integridade do sistema radicular. O material foi cuidadosamente lavado e, posteriormente, determinados o número de nódulos por planta (NN), matéria seca de nódulos por planta (MSN) e matéria seca por nódulo (MSPN), conforme descrito no subitem 3.2.3.2.

3.3.4.4 *Matéria seca da parte aérea*

Todo o material correspondente à parte aérea (caules, folhas e estruturas reprodutivas), coletado das cinco plantas nos estádios R6 e R8, foi seco em estufa de circulação forçada a 60 °C por 72 horas e, em seguida, pesado para determinação da MSPA, conforme descrito no subitem 3.2.3.3. Adicionalmente, nos dois experimentos conduzidos em Botucatu, foram determinados a MSPA em seis coletas de plantas ao longo do ciclo da cultura, a partir da aplicação dos tratamentos em V4, ou seja, com 25, 35, 45, 55, 65 e 75 DAE das plantas. Os resultados de MSPA foram expressos em kg ha⁻¹, mediante a multiplicação pela população final de plantas.

3.3.4.5 *Teor e quantidade acumulado de N na parte aérea*

O material utilizado para determinação da MSPA (item 3.3.4.4), depois de moído em moinho tipo Willey, foi submetido à análise para determinação do TN (Malavolta *et al.*, 1997). Posteriormente, os valores de TN foram multiplicados pela MSPA para o cálculo da NAPA, conforme descrito no subitem 4.2.3.4. Os resultados de NAPA foram expressos em kg ha^{-1} .

3.3.4.6 *População final das plantas*

A determinação da população final foi realizada na véspera da colheita, considerando duas fileiras centrais com comprimento de três metros em cada parcela experimental, sendo os resultados convertidos em plantas ha^{-1} .

3.3.4.7 *Componentes agronômicos e produtividade de grãos*

Na ocasião da colheita, quando as plantas atingiram o estágio R9, foram coletadas dez plantas nas duas fileiras centrais da área útil das parcelas experimentais para determinação do número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV) e massa de 100 grãos (M100G). O NVP por planta foi determinado mediante a relação entre número total de vagens e o número total de plantas. O NGV foi determinado mediante a relação entre número total de grãos e o número total de vagens nas dez plantas. A M100G foi avaliada através da pesagem de duas amostras, de 100 grãos cada uma, de cada unidade experimental e os dados obtidos transformados para 13% de umidade (base úmida).

A produtividade de grãos (PROD) foi determinada mediante a colheita manual de todas as plantas contidas na área útil de cada parcela experimental (duas linhas de três metros). Após esta operação, as plantas foram secas ao sol e, posteriormente, trilhadas mecanicamente. Os grãos, após abanação para separação de impurezas, foram pesados e calculado a PROD em kg ha^{-1} , corrigida para 13% de umidade (base úmida).

3.3.4.8 *Teor de N e proteína nos grãos*

Após a colheita, amostras dos grãos do feijão-comum foram secas em estufa de circulação forçada a 60 °C por 72 horas e moídos em moinho tipo Willey e submetidas

à análise do teor de N nos grãos (TNG) (Malavolta *et al.*, 1997). Os resultados foram expressos em g kg⁻¹. Em seguida, o teor de proteína bruta nos grãos (TPG) de feijão-comum proveniente dos diversos tratamentos, foi obtido pela multiplicação do resultado de TNG por um fator arbitrário, que representa um fator médio para o material em estudo, que é de 6,25 (Fidelis *et al.*, 2019).

3.3.4.9 Produtividade de proteína

O teor de proteína bruta nos grãos foi multiplicado pela produtividade de grãos (matéria seca), para o cálculo da produtividade de proteína bruta (PPB), sendo o resultado expresso em kg ha⁻¹.

3.3.4.10 Análise econômica

A análise econômica foi realizada conforme metodologia descrita por Pelegrin *et al.* (2009), sendo considerados os custos da aquisição da ureia (tonelada) e sua aplicação (a lanço), o custo do inoculante (dose comercial) e custo de aplicação da inoculação e reinoculação. Os demais custos operacionais de produção, como despesas de plantio e tratos culturais, não foram considerados para esta análise, por serem os mesmos utilizados em todos os tratamentos. Foram considerados na análise os preços praticados nas lavouras comerciais em sistema de plantio direto, dos principais estados produtores de feijão-comum (Paraná, Minas Gerais, Mato Grosso, Goiás e Bahia) e no estado de São Paulo, onde foram conduzidos os experimentos de campo.

Para os custos operacionais da aplicação dos tratamentos (adubação a lanço, inoculação das sementes e reinoculação em pós-emergência) foi utilizado um valor fixo para cada atividade em todas as simulações econômicas realizadas, sendo eles: custo operacional da aplicação de ureia a lanço de R\$ 26,60 ha⁻¹; custo operacional da inoculação das sementes de R\$ 6,60 ha⁻¹; e o custo operacional da inoculação das sementes + aplicação o inóculo em pós-emergência de R\$ 33,20 ha⁻¹. Estes custos operacionais foram embasados em outros trabalhos econômicos com a cultura do feijoeiro-comum utilizando as mesmas práticas operacionais (Coelho *et al.*, 2021; Pelegrin *et al.*, 2009; Barbosa Filho e Silva, 2001).

Os custos dos insumos, assim como o valor comercial da saca de feijão-comum (60 kg), foram obtidos mediante uma série histórica, de 2014 a 2024, na Companhia

Nacional de Abastecimento (Conab, 2024b) e a busca dos dados foi realizada no mês de julho de 2024. O conjunto de dados foi composto pelos valores (R\$) comerciais dos insumos e do feijão, para cada ano e em cada estado amostrado. Em seguida, realizou-se uma média aritmética simples dos estados, com o intuito de se obter um valor médio dentro de cada ano. Na figura 4 é apresentado o fluxograma mais detalhado desta análise.

A análise econômica foi processada apenas para os dois experimentos conduzidos em Botucatu e as simulações foram feitas como se cada tratamento do experimento representasse uma safra comercial. Para esta análise, foram determinados o custo de cada tratamento (CT), o incremento da produtividade (IP), o acréscimo da receita bruta (ARB) e o acréscimo da receita líquida (ARL) para cada tratamentos com inoculação, reinoculação ou adubação nitrogenada, em relação à testemunha absoluta (ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada) (Pelegrin *et al.*, 2009).

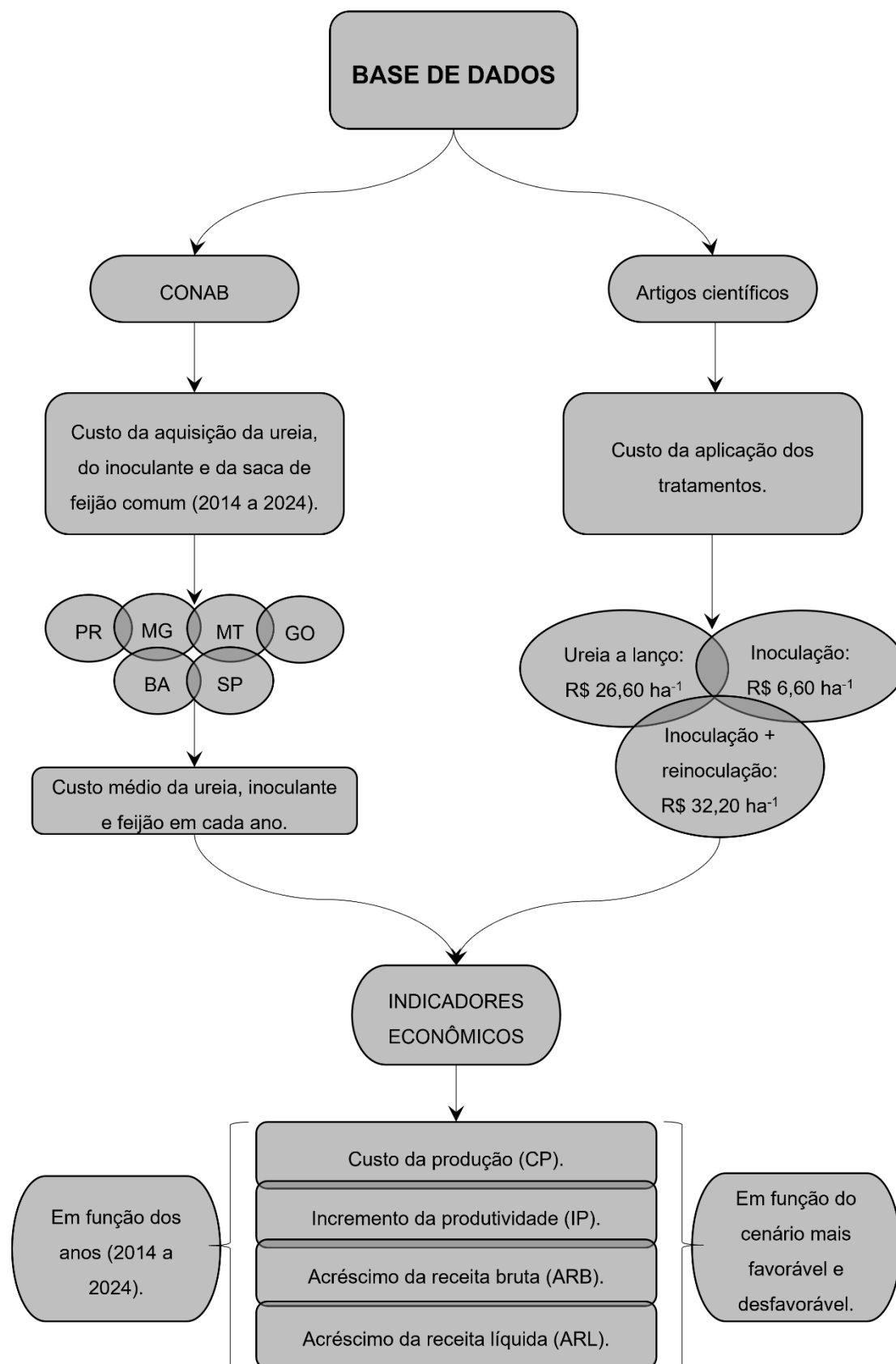
O custo de cada tratamento foi calculado com base no custo da ureia (R\$ ha⁻¹) e do inoculante (R\$ ha⁻¹). No caso da adubação nitrogenada, o referido custo do insumo, em cada ano amostrado, foi calculado para as duas doses de N-mineral utilizadas (60 e 120 kg ha⁻¹), sendo somente está a variação de custo nos tratamentos fertilizados com N independentemente da cultivar. Quanto ao custo do inoculante, nos tratamentos que receberam inoculante rizobiano (na semente), este variou de acordo com a cultivar. Por exemplo, a dose da inoculação via semente é feita com base no peso de 50 kg de sementes, ou seja, 200 g do inoculante turfoso. Logo, a quantidade (peso) de sementes utilizadas para semear cada cultivar era variado, pois, quanto maior o peso de 1000 sementes, maior a quantidade total de sementes será necessária para semear um hectare e, conseqüentemente, a quantidade de inoculante aumenta.

Segundo Pelegrin *et al.* (2009), entende-se por incremento da produtividade a diferença entre a produtividade de grãos correspondente a cada um dos tratamentos em relação ao tratamento controle. O acréscimo de receita bruta foi determinado pelo acréscimo de produtividade multiplicado pelo preço de venda do feijão-comum. O acréscimo de receita líquida foi obtido pela diferença entre o acréscimo de receita bruta e os custos da adubação nitrogenada, sua aplicação e, ou, inoculação e reinoculação.

Foi utilizada a produtividade média dos dois experimentos conduzidos em Botucatu, para cada tratamento (formas para fornecimento de N) em cada cultivar estudada. As variáveis analisadas foram determinadas em função dos anos (2014-2024) e, também, foram apresentadas em dois possíveis cenários: mais favorável e mais desfavorável. O cenário mais favorável foi considerado quando o preço do fertilizante/inoculante foi menor e o do feijão maior. O mais desfavorável seria aquele onde o preço do fertilizante/inoculante foi maior e o do feijão menor.

Ainda, com base nos dois cenários, foi determinado o retorno sobre o capital investido (RCI). Entende-se por RCI, segundo Baumgärtner et al. (2018), o retorno que se terá sobre o capital investido e avalia a eficiência e lucratividade econômica de uma empresa e/ou atividade. Para calcular o RCI, nos dois cenários econômicos, subtraiu-se o ARB pelo CT, o resultado desta operação foi subtraído pelo CT e multiplicado por 100, para se obter o RCI em %.

Figura 4 – Fluxograma do processo da análise econômica realizada nos dois experimentos de campo conduzidos em Botucatu



FONTE: Elaborado pelo autor (Sousa, 2025).

3.4 Análise estatística dos resultados

3.4.1 Experimento de casa de vegetação

Os resultados no experimento de casa de vegetação foram submetidos à análise de variância, considerando um duplo fatorial (cultivar × tratamentos). Quando houve efeito significativo, pelo teste F, para o fatorial ou para os fatores isoladamente, estes foram comparados pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Para os tratamentos que compuseram as doses do inoculante líquido (400, 800 e 1200 mL ha⁻¹) pulverizados em pós-emergência, além da inoculação exclusivamente na semente (T2) representando o nível 0 mL ha⁻¹, foi realizada a análise de regressão polinomial para avaliar os efeitos das pulverizações de reinoculação em pós-emergência. No processamento estatístico dos dados, foi utilizado o programa SISVAR (Ferreira *et al.*, 2011).

Ainda, foi empregada ainda a análise de componentes principais (PCA) para visualizar e interpretar as inter-relações entre as variáveis avaliadas e os diferentes tratamentos de fornecimento de N, utilizando o software R versão 4.2.1 (R Core Team, 2022). Com isso, pretendeu-se estimar uma dose do inoculante, pulverizado em pós-emergência, com o máximo efeito sobre as características avaliadas nas cultivares de feijão-comum investigadas. Os resultados da análise de regressão não foram utilizados para discussão dos resultados, mas, disponibilizou-se tais resultados nos apêndices.

3.4.2 Experimentos de campo

Os dados da cv. TAA Dama dos quatro experimentos foram analisados de forma conjunta, considerado um fatorial duplo (experimento × forma de fornecimento de N). Em seguida, realizou-se uma análise variância (ANOVA) dos dois experimentos conduzidos em Botucatu, considerando um duplo fatorial (cultivar × forma de fornecimento de N). Na ocasião, os prováveis efeitos dos tratamentos foram discriminados e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os dados de MSPA e NAPA, determinados ao longo do ciclo da cultura, dos dois experimentos conduzidos em Botucatu, foram submetidos a análise de regressão. Foi utilizado o programa SigmaPlot 12.5 no processamento da análise e plotagem dos

gráficos (SigmaPlot, 2013). Ainda em Botucatu, os resultados dos dois experimentos conduzidos foram submetidos a análise de PCA. Esta abordagem multivariada permitiu identificar os padrões de resposta e a influência das diferentes estratégias de manejo de N no desempenho das cultivares em campo. Foi utilizado, para processar a análise de PCA, software R versão 4.2.1 (R Core Team, 2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Doses de inoculante para reinoculação em cobertura (casa de vegetação)

No estágio de desenvolvimento R6, o número de nódulos (NN) e matéria seca de nódulos (MSN) foi significativamente superior na cv. TAA Dama, quando comparada às outras cultivares estudadas (Tabela 7). Já no estágio R8, houve uma equivalência para a MSN e matéria seca radicular (MSR) entre as cultivares TAA Dama e IPR Campos Gerais, com os maiores resultados obtidos em ambas as cultivares nas variáveis citadas. Quanto à matéria seca por nódulo (MSPN), as cultivares IPR Andorinha e TAA Dama foram superiores a IPR Campos Gerais no estágio R6 e não houve diferença entre as três cultivares no estágio R8. A superioridade da cv. TAA Dama em termos de nodulação e biomassa de nódulos no estágio R6, e sua equivalência com IPR Campos Gerais em R8 para MSN e MSR, sugerem uma maior eficiência simbiótica ou uma maior capacidade de resposta à inoculação por parte dessas cultivares.

As diferentes formas de aplicação de N influenciaram o número e a biomassa dos nódulos, na qual a inoculação + reinoculação em pós-emergência (400, 800 e 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido) resultaram nos maiores valores absolutos de NN e MSN no estágio R6, apesar de não diferir estatisticamente do controle ou da inoculação apenas via semente (Tabela 7). Enquanto no estágio R8, as maiores médias para NN foram obtidas com a pulverização em pós-emergência do inoculante líquido de 800 e 1200 mL ha⁻¹. A MSN não diferiu significativamente do controle em relação as formas para fornecimento de N (inoculação e/ou inoculação + reinoculação). O tratamento com N-mineral (120 kg ha⁻¹) proporcionou valores mais baixos para NN e MSN, especialmente no estágio R8. Isso ocorre porque, possivelmente, com o solo dispondo de N prontamente assimilável, a planta tende a investir menos energia na formação de nódulos para FBN. A MSPN não foi afetada pela forma de fornecimento de N. Apenas a MSR avaliada no estágio R8 foi afetada pela forma de fornecimento de N, sendo o maior valor proporcionado pelo fornecimento de N mineral (equivalente a 120 kg N ha⁻¹).

Tabela 7 – Teste de médias e resumo da análise de variância para o número de nódulos (NN), matéria seca de nódulos (MSN), matéria seca por nódulo (MSPN), matéria seca radicular (MSR) de cultivares de feijão-comum nos estádios fenológicos R6 e R8 submetidas a diferentes formas para fornecimento de N, em condições de casa de vegetação

Tratamento	NN	MSN	MSPN	MSR
	nº planta ⁻¹	mg planta ⁻¹	mg nódulo ⁻¹	g planta ⁻¹
Estádio R6				
Cultivar (C)				
IPR Andorinha	74,67 b ⁽¹⁾	56,52 b	0,76 a	1,67 a
IPR Campos Gerais	95,17 b	38,05 b	0,34 b	2,04 a
TAA Dama	157,11 a	105,30 a	0,61 a	2,05 a
Fornecimento de N (FN) ⁽²⁾				
Controle	111,22 ab	59,27 ab	0,55 a	1,95 a
Inoculação na semente	107,89 ab	50,72 ab	0,45 a	1,73 a
Inoculação + reinoculação I	118,44 a	95,77 a	0,81 a	1,57 a
Inoculação + reinoculação II	127,78 a	83,66 a	0,65 a	2,28 a
Inoculação + reinoculação III	154,11 a	97,72 a	0,55 a	2,17 a
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	34,44 b	12,61 b	0,39 a	1,80 a
Fonte de Variação	$P > F$			
C	<0,001	<0,001	<0,001	0,195
FN	0,002	<0,001	0,090	0,269
C × FN	0,216	0,233	0,207	0,449
CV (%)	50,6	63,1	54,0	36,5
Estádio R8				
Cultivar (C)				
IPR Andorinha	161,56 a ⁽¹⁾	123,59 b	0,85 a	1,20 b
IPR Campos Gerais	241,61 a	214,41 a	1,01 a	1,96 a
TAA Dama	234,00 a	201,69 a	0,92 a	1,76 a
Fornecimento de N (FN) ⁽²⁾				
Controle	223,00 ab	240,77 a	1,09 a	1,68 ab
Inoculação na semente	209,11 ab	169,80 a	0,87 a	1,35 b
Inoculação + reinoculação I	216,89 ab	197,88 a	1,07 a	1,73 ab
Inoculação + reinoculação II	284,44 a	219,05 a	0,84 a	1,21 b
Inoculação + reinoculação III	264,89 a	202,61 a	1,00 a	1,50 b
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	76,00 b	49,27 b	0,66 a	2,37 a
Fonte de Variação	$P > F$			
C	0,065	0,002	0,661	<0,001
FN	0,005	<0,001	0,442	0,002
C × FN	0,138	0,276	0,372	0,597
CV (%)	51,2	42,5	53,5	34,2

⁽¹⁾Médias seguidas da mesma letra, na coluna e dentro de cada fator e época de avaliação, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ⁽²⁾Controle: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação I: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 400 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; Inoculação + reinoculação II: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 800 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; Inoculação + reinoculação III: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

No estágio R6, as cultivares IPR Andorinha e TAA Dama sobressaíram em termos de índice relativo de clorofila do trifólio novo do ápice da planta (IRCN) e no trifólio velho da parte basal da planta (IRCV) (Tabela 8). Porém, no estágio R8, a TAA Dama apresentou os maiores valores para IRCN e IRCV. A fertilização com N-mineral na dose de 120 kg ha⁻¹ aumentou significativamente o IRCN e IRCV no estágio R6, com incrementos de 17 e 12%, respectivamente, quando comparado ao controle (Tabela 8). No R8, o tratamento com N-mineral também sobressaiu perante os demais, com valor de IRCV 24% maior que o controle e superando também os tratamentos com inoculação via semente e via semente + reinoculação com 400 mL ha⁻¹. No geral, houve uma redução nos valores de IRCV do estágio R6 para o R8, o que é esperado, pois folhas velhas tendem a senescer e perder clorofila.

Quanto à matéria seca da parte aérea (MSPA), as maiores médias foram obtidas na cv. TAA Dama, no estágio R6, enquanto em R8 a mesma cultivar e a IPR Campos Gerais se igualaram em termos de MSPA (Tabela 8). No estágio R6, a MSPA teve os maiores resultados quando o feijão-comum foi submetido à dose de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido aplicado em pós-emergência da cultura; no entanto, não diferiu estatisticamente do controle e dos demais tratamentos estudados, apenas do tratamento com a menor dose do inoculante aplicado via cobertura (400 mL ha⁻¹). Em R8, tal resultado foi mais pronunciado no tratamento com N-mineral, o qual obteve a maior média em comparação aos demais tratamentos. É interessante notar o aumento da MSPA do estágio R6 para o R8, em todas as cultivares, indicando o acúmulo de biomassa ao longo do ciclo da cultura.

Houve interação significativa para o teor de N na parte aérea (TN) do feijoeiro-comum (Tabela 8). Isto é importante, pois significa que a resposta do TN à uma forma específica de fornecimento de N não foi a mesma para todas as cultivares. Por exemplo, no estágio R6, os valores de TN foram superiores para o tratamento com inoculação exclusivamente na semente (49 g kg⁻¹) e no tratamento com N-mineral (48 g kg⁻¹) para a cv. IPR Campos Gerais, enquanto a adubação mineral proporcionou os maiores valores nas demais cultivares (Figura 5A). O mesmo resultado se repetiu para a cv. IPR Andorinha, no estágio R8, com melhores resultados obtidos nos tratamentos com N-mineral (21,4 g kg⁻¹) e o tratamento com inoculação + reinoculação com 400 mL ha⁻¹ do inoculante em pós-emergência (22 g kg⁻¹) (Figura 5B). Porém, também em R8, a cv. IPR Campos Gerais teve maiores valores de TN quando submetida à

inoculação + reinoculação com 1200 mL ha⁻¹ do inoculante em pós-emergência (32 g kg⁻¹). Para as demais cultivares não houve efeitos das formas de fornecimento de N sobre os valores de TN mensurado em R8.

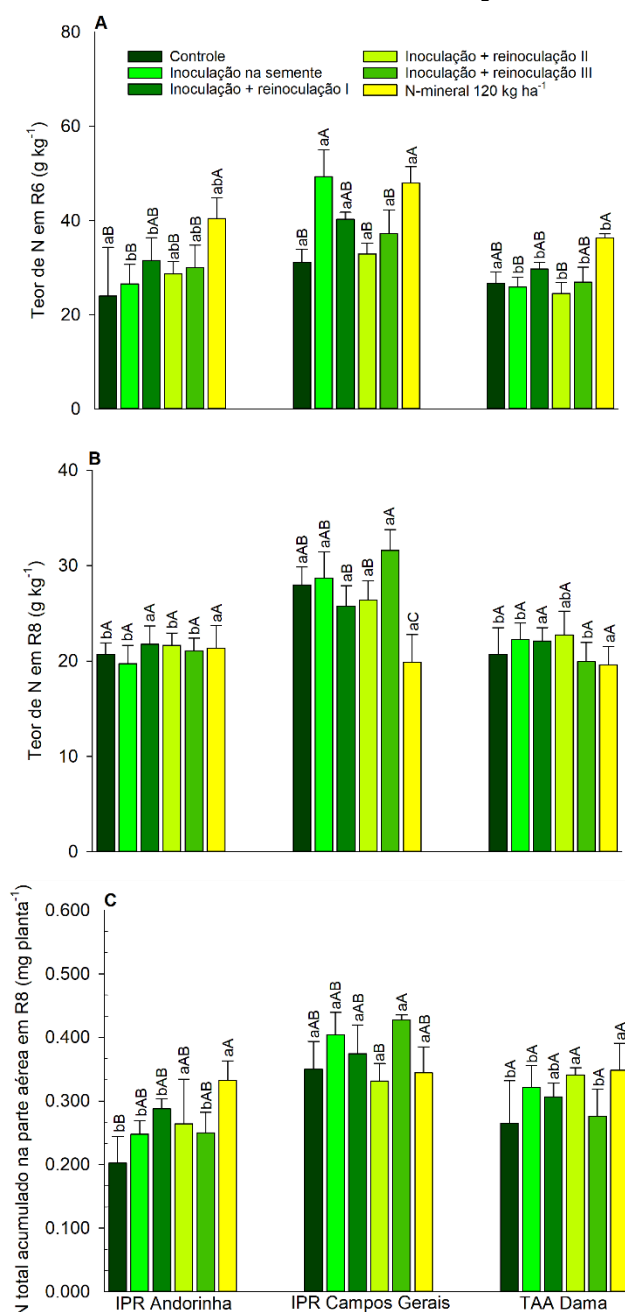
Em R6, quantidade de N total acumulado na parte aérea (NAPA) foi maior no tratamento com N-mineral, não apresentando diferença estatística para o tratamento com inoculação + reinoculação com dose de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido (Tabela 8). Em R8, o tratamento com N-mineral proporcionou maior valor de NAPA para as cultivares IPR Andorinha e TAA Dama (Figura 5C). No entanto, a TAA Dama também apresentou valor NAPA elevado no tratamento com inoculação + reinoculação com 800 mL ha⁻¹ do inoculante líquido, não diferindo do tratamento fertilizado com N-mineral. No caso da cv. IPR Campos Gerais, o maior valor de NAPA foi proporcionado pelo tratamento com inoculação + reinoculação com dose de 1200 mL ha⁻¹.

Tabela 8 – Teste de médias e resumo da análise de variância para o índice relativo de clorofila no trifólio novo do ápice da planta (IRC�) e no trifólio velho da parte basal da planta (IRCV), matéria seca da parte aérea (MSPA), teor de N na parte aérea (TN) e quantidade de N total acumulado na parte aérea (NAPA) de cultivares de feijão-comum nos estádios fenológicos R6 e R8 submetidas a diferentes formas para fornecimento de N em condições de casa de vegetação

Tratamento	IRC�	IRCV	MSPA	TN	NAPA
	SPAD	SPAD	g planta ⁻¹	g kg ⁻¹	mg planta ⁻¹
Estádio R6					
Cultivar (C)					
IPR Andorinha	36,11 a ⁽¹⁾	37,84 a	6,67 b	30,18 b	0,1994 a
IPR Campos Gerais	32,78 b	35,34 b	5,44 b	39,79 a	0,2092 a
TAA Dama	37,25 a	37,92 a	8,18 a	28,31 b	0,2332 a
Fornecimento de N (FN) ⁽²⁾					
Controle	33,52 b	35,48 b	6,84 ab	27,25 c	0,1842 b
Inoculação na semente	34,32 b	36,18 ab	6,27 ab	33,89 b	0,1899 b
Inoculação + reinoculação I	34,66 b	37,53 ab	5,31 b	33,82 b	0,1749 b
Inoculação + reinoculação II	35,48 b	36,79 ab	6,61 ab	28,69 bc	0,1843 b
Inoculação + reinoculação III	35,07 b	36,52 ab	7,99 a	31,38 bc	0,2471 ab
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	39,22 a	39,70 a	7,54 ab	41,55 a	0,3029 a
Fonte de Variação	<i>P</i> > <i>F</i>				
C	<0,001	0,015	<0,001	<0,001	0,282
FN	<0,001	0,050	0,042	<0,001	<0,001
C × FN	0,139	0,085	0,518	0,013	0,685
CV (%)	6,9	7,7	26,2	12,5	30,1
Estádio R8					
Cultivar (C)					
IPR Andorinha	40,36 b ⁽¹⁾	29,16 ab	12,58 b	21,05 b	0,2639 c
IPR Campos Gerais	40,20 b	26,97 b	14,17 a	26,71 a	0,3719 a
TAA Dama	45,33 a	30,80 a	14,63 a	21,22 b	0,3096 b
Fornecimento de N (FN) ⁽²⁾					
Controle	40,96 a	27,59 b	11,66 b	23,13 ab	0,2722 b
Inoculação na semente	40,19 a	26,22 b	13,78 b	23,54 a	0,3244 ab
Inoculação + reinoculação I	42,13 a	27,31 b	13,96 b	23,19 ab	0,3228 ab
Inoculação + reinoculação II	42,23 a	28,62 ab	13,34 b	23,59 a	0,3121 ab
Inoculação + reinoculação III	42,91 a	30,00 ab	13,02 b	24,21 a	0,3176 ab
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	43,36 a	34,12 a	17,00 a	20,28 b	0,3418 a
Fonte de Variação	<i>P</i> > <i>F</i>				
C	<0,001	0,019	0,004	<0,001	<0,001
FN	0,478	0,002	<0,001	0,006	0,016
C × FN	0,202	0,389	0,963	<0,001	0,010
CV (%)	8,9	13,4	12,9	9,1	12,2

⁽¹⁾Médias seguidas da mesma letra, na coluna e dentro de cada fator e época de avaliação, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ⁽²⁾Controle: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação I: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 400 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; Inoculação + reinoculação II: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 800 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; Inoculação + reinoculação III: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

Figura 5 – Desdobramento entre cultivares (IPR Andorinha, IPR Campos Gerais e TAA Dama) e formas para fornecimento de N, para a variável teor de N na parte aérea (TN) do feijão-comum nos estádios R6 (A) e R8 (B), e quantidade de N total acumulado na parte aérea em R8 (C), em condições de casa de vegetação. Letras minúsculas comparam as cultivares dentro de cada forma de fornecimento de N, enquanto letras maiúsculas comparam as formas de fornecimento de N dentro de cada cultivar com valor de $p < 0,05$ de acordo com o teste de Tukey



Controle: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação I: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 400 mL ha^{-1} do inoculante líquido; Inoculação + reinoculação II: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 800 mL ha^{-1} do inoculante líquido; Inoculação + reinoculação III: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha^{-1} do inoculante líquido; N-mineral 120 kg ha^{-1} : fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha^{-1} de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

O número de vagens por planta (NVP) foi superior na cv. IPR Campos Gerais, enquanto o número de grãos por vagem (NGV) e a massa de 100 grãos (M100G) foram maiores na cv. TAA Dama (Tabela 9). Quanto às formas de fornecimento de N, o N-mineral (120 kg ha^{-1}) foi claramente o mais eficiente, resultando nos maiores valores, com incrementos de 48% no NVP e 19% no NGV, em relação ao controle. A M100G não foi afetada pela forma de fornecimento de N. Em suma, nas condições que este estudo foi conduzido, as estratégias de inoculação, em relação as características avaliadas, não foram eficazes em superar o controle ou se igualar ao N-mineral.

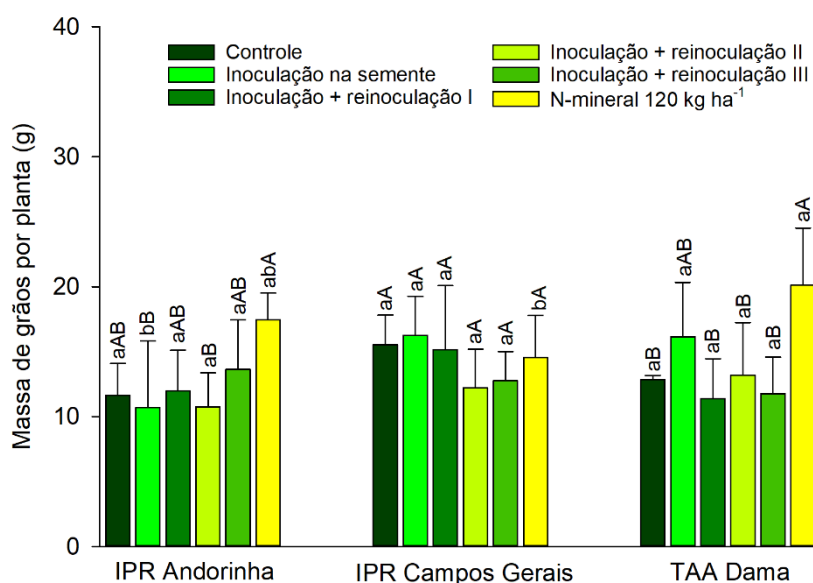
Tabela 9 – Teste de médias e resumo da análise de variância para o número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), massa de 100 grãos (M100G) e massa de grãos por planta (MGP) de cultivares de feijão-comum no estágio fenológico R9 submetidas a diferentes formas para fornecimento de N em condições de casa de vegetação

Tratamento	NVP	NGV	M100G	MGP
	nº planta ⁻¹	nº vagem ⁻¹	g	g planta ⁻¹
Cultivar (C)				
IPR Andorinha	8,83 b ⁽¹⁾	5,56 b	26,76 b	12,68 a
IPR Campos Gerais	10,28 a	5,83 ab	24,82 b	14,40 a
TAA Dama	8,39 b	6,00 a	29,89 a	14,24 a
Fornecimento de N (FN) ⁽²⁾				
Controle	8,11 b	5,33 b	26,95 a	13,33 b
Inoculação na semente	9,22 b	5,78 ab	27,62 a	14,36 ab
Inoculação + reinoculação I	8,67 b	6,00 ab	26,26 a	12,83 b
Inoculação + reinoculação II	8,22 b	5,67 ab	26,79 a	12,04 b
Inoculação + reinoculação III	8,78 b	5,67 ab	28,08 a	12,71 b
N-mineral 120 kg ha^{-1}	12,00 a	6,33 a	27,22 a	17,38 a
Fonte de Variação	$P > F$			
C	<0,001	0,036	<0,001	0,087
FN	<0,001	0,004	0,685	<0,001
C × FN	0,643	0,177	0,495	0,039
CV (%)	14,8	8,6	8,9	18,0

⁽¹⁾Médias seguidas da mesma letra, na coluna e dentro de cada fator, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ⁽²⁾Controle: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação I: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 400 mL ha^{-1} do inoculante líquido; Inoculação + reinoculação II: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 800 mL ha^{-1} do inoculante líquido; Inoculação + reinoculação III: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha^{-1} do inoculante líquido; N-mineral 120 kg ha^{-1} : fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha^{-1} de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

A massa de grãos por planta (MGP) apresentou interação significativa, com maior resultado para a referida variável quando foi adotado o tratamento com N-mineral, nas cultivares IPR Andorinha e TAA Dama (Figura 6). A cv. IPR Campos Gerais se destacou por não ter respondido significativamente ao N-mineral da mesma forma que as outras cultivares. Isto sugere que para a MGP, está cultivar parece ter um bom desempenho com as estratégias de inoculação e não se beneficiou adicionalmente do N-mineral na mesma magnitude. As diferentes formas de inoculação não foram capazes de igualar o desempenho do N-mineral para a MGP em nenhuma das cultivares.

Figura 6 – Desdobramento entre cultivares (IPR Andorinha, IPR Campos Gerais e TAA Dama) e as diferentes formas para fornecimento de N, para a variável massa de grãos por planta (MGP) do feijão-comum no estágio fenológico R9 em condições de casa de vegetação. Letras minúsculas comparam as cultivares dentro de cada forma de fornecimento de N, enquanto letras maiúsculas comparam as formas de fornecimento de N dentro de cada cultivar com valor de $p < 0,05$ de acordo com o teste de Tukey



Controle: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação I: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 400 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; Inoculação + reinoculação II: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 800 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; Inoculação + reinoculação III: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

A análise de componentes principais (PCA) do experimento de casa de vegetação demonstrou que a variância acumulada nos dois primeiros componentes principais (CP1 e CP2) representou 78,1% das variações totais no conjunto de dados

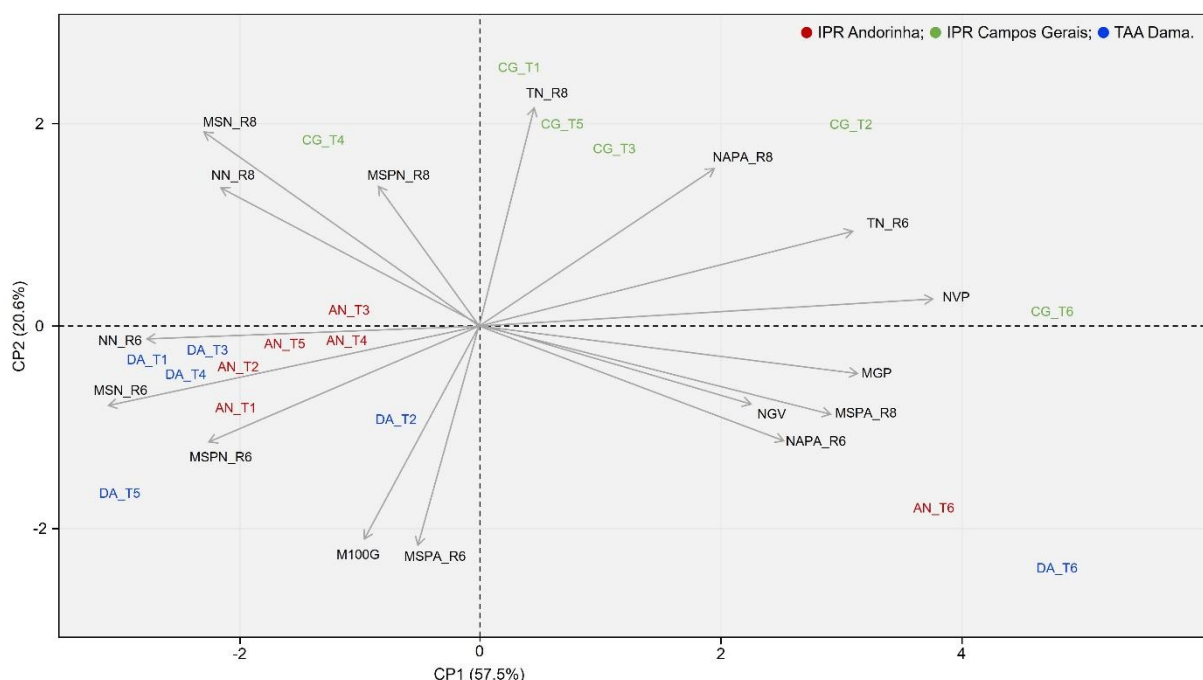
avaliados (Figura 7). Isso indica que a maior parte da variabilidade observada pode ser explicada por esses dois componentes, fornecendo uma representação robusta das relações entre as variáveis e os tratamentos.

O componente principal 1 (CP1), que explicou a maior parte da variância, está fortemente associado as variáveis relacionadas ao crescimento, acúmulo de N e produtividade, como a MSPA em R8, TN em R6 e R8, NAPA em R6 e R8, NVP, NGV e MGP (Figura 7). O tratamento com fertilização nitrogenada (T6), especialmente na cv. TAA Dama e IPR Andorinha (DA_T6 e NA_T6), agruparam-se no lado positivo do CP1, indicando que esses tratamentos e cultivares foram os que mais se beneficiaram da adição de N-mineral, resultando em maior acúmulo de N. Este resultado, especialmente na dose de 120 kg ha⁻¹, já era esperado, pois o fornecimento de N-mineral em doses elevadas geralmente promove um forte crescimento vegetativo e acúmulo de biomassa e N nas plantas, otimizando os componentes agrônômicos (Hirel *et al.*, 2011; Taiz e Zeiger, 2010).

Por outro lado, variáveis relacionadas à nodulação, como NN, MSN e MSPN, avaliados em R8, agruparam-se no lado negativo do CP1 e positivo do CP2 (Figura 7). As cultivares IPR Campos Gerais e IPR Andorinha submetidas a tratamentos de inoculação (T2, T3, T4, T5) tenderam a se agrupar nessa região do biplot. Isso sugere que, embora a inoculação com *Rhizobium* tenha otimizado consistentemente a nodulação das plantas, conforme mencionado ao longo deste trabalho, o impacto na produtividade e no acúmulo total de N na parte aérea foi menor em comparação com a fertilização mineral em condições de casa de vegetação. A cv. TAA Dama também se posicionou no lado negativo do CP1, mas com maior dispersão, indicando uma resposta diferenciada aos tratamentos de inoculação.

Os tratamentos de reinoculação em pós-emergência (T3, T4, T5) mostraram-se mais próximos dos tratamentos de inoculação na semente (T2) e controle (T1) em termos de agrupamento, especialmente para as variáveis de acúmulo de N, reforçando a observação de que, em casa de vegetação, a reinoculação não superou a fertilização mineral em termos de impacto no desenvolvimento do feijoeiro-comum (Figura 7). No entanto, é possível observar que a reinoculação demonstrou potencial para aumentar a nodulação e o acúmulo de N em algumas cultivares, especialmente em condições de campo.

Figura 7 – Análise de componentes principais (PCA) do experimento conduzido em casa de vegetação com três cultivares (IPR Andorinha, IPR Campos Gerais e TAA Dama) e diferentes formas para fornecimento de N



AN: IPR Andorinha; CG: IPR Campos Gerais; DA: TAA Dama. T1: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; T2: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; T3: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 400 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; T4: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 800 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; T5: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; T6: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

Em síntese, o estudo em condições de casa de vegetação foi conduzido para determinar a dose do inoculante líquido, que aplicado em pós-emergência (reinoculação), possibilitasse o maior desempenho agrônomo das cultivares de feijão-comum. Com base nos resultados obtidos, foi possível notar que os dados não seguiram uma tendência clara, ou pelo menos, não surtiram o efeito pressuposto previamente. Ou seja, pouco se teve interação entre as formas para fornecimento de N e as cultivares estudadas. O mesmo foi observado por Sousa et al. (2022b), que estudaram os efeitos da inoculação na semente, suplementada com inoculação em cobertura (reinoculação), em duas cultivares de feijão-comum.

No que tange a nodulação e FBN do feijoeiro, as diferenças encontradas entre as cultivares estudadas são amplamente reconhecidas na literatura (Sousa et al., 2022b; Andraus et al., 2016). A variabilidade genotípica existente nas cultivares de feijão-comum, onde a depender da cultivar e do seu ciclo de crescimento, tais diferenças nas variáveis de nodulação podem ser mais influenciadas pelo fator

genético, o que justifica os resultados obtidos no presente estudo. Isto é importante no momento da escolha da cultivar a ser plantada. Por exemplo, Karavidas et al. (2022) destacam que a seleção de cultivares com alta capacidade de nodulação e performance da FBN é fundamental para maximizar os benefícios da FBN.

As doses de inoculante aplicadas em pós-emergência surtiram efeito positivo na nodulação, como esperado, enquanto o N-mineral demonstrou certa inibição da atividade dos rizóbios, o que afetou diretamente na nodulação do feijoeiro-comum, conforme já relatado anteriormente na literatura (Sousa *et al.*, 2022b; Glodowska e Wozniak, 2019). Mwenda et al. (2023) explicam que a disponibilidade de N prontamente assimilável no solo pode levar a planta a investir menos energia na formação de nódulos, priorizando a absorção direta do N-mineral. Pereira et al. (2022) também observaram que altas doses de N-mineral tem um efeito deletério na nodulação, o que reforça a necessidade de um manejo cuidadoso da adubação nitrogenada para não comprometer a FBN.

De todo modo, a eficácia da reinoculação em pós-emergência, que resultou em maiores valores absolutos de NN e MSN em R6, aponta para o potencial dessa prática em otimizar a FBN. Embora não tenha havido diferença estatística em todos os casos, o resultado observado sugere que a suplementação de *Rhizobium* em fases posteriores do desenvolvimento da planta pode ser benéfica, especialmente em condições onde a população nativa de rizóbios é insuficiente ou menos eficiente. Pereira et al. (2022) também indicam que a reinoculação pode ser uma estratégia para maximizar os resultados da inoculação, complementando a aplicação via semente.

Nas características diretamente relacionadas com o estado nutricional nitrogenado do feijão-comum, que seria o IRC e o TN; esses resultados indicam que, independentemente da disponibilidade/fornecimento de N, as cultivares provavelmente apresentaram diferenças morfofisiológicas na espessura, no teor de pigmento e na estrutura interna das folhas amostradas, o que afetou as propriedades espectrais da folha, com efeitos nos valores do IRC (Maia *et al.*, 2017).

O aumento índices de clorofila (IRCN e IRCV) com a aplicação de N-mineral, especialmente em R8, demonstra a importância do N para o crescimento vegetativo e a fotossíntese. O N é um componente essencial da clorofila e de outras moléculas vitais para o desenvolvimento da planta (Khare *et al.*, 2025; Rebeschini *et al.* 2014). A maior MSPA com N-mineral em R8, em comparação com os tratamentos de inoculação, pode indicar que, em certas fases do ciclo da cultura, a demanda por N

pode exceder a capacidade de fornecimento pela FBN, tornando a suplementação mineral vantajosa. No entanto, é crucial equilibrar essa suplementação para não inibir a FBN, como discutido anteriormente.

A interação significativa entre cultivar e fornecimento de N para o TN e NAPA ressalta a complexidade do sistema produtivo. A resposta variada das cultivares à diferentes fontes de N (inoculação × N-mineral) sugere que a escolha da cultivar é um fator crítico no sucesso das estratégias de manejo de N. Algumas cultivares podem ser mais responsivas à FBN, enquanto outras podem se beneficiar mais da adubação mineral em determinadas condições. A cv. TAA Dama, por exemplo, mostrou um bom desempenho em termos de IRC e NAPA mesmo com inoculação, sugerindo uma boa capacidade de FBN. Isso reforça a necessidade de estudos específicos para cada cultivar e região, a fim de otimizar as práticas de manejo e garantir a sustentabilidade da produção de feijão-comum.

Almeida et al. (2022), os quais também trabalharam com doses de reinoculação, porém associadas com a co-inoculação com *Azospirillum brasilense*, relataram alguns efeitos similares aos encontrados no presente estudo, principalmente para conteúdo de N. Os autores relataram um efeito da reinoculação associada a co-inoculação com *A. brasilense*, que resultou em teores de N estatisticamente maiores quando comparado ao controle (sem reinoculação e co-inoculação). Relataram também, maiores teores de N para as cultivares que receberam tratamento com N-mineral (20 e 50 kg ha⁻¹ no plantio e em cobertura, respectivamente).

Os resultados obtidos sugerem que há uma interferência, em termos de desempenho agrônomo, em resposta à inoculação + reinoculação com *R. tropici*. No entanto, não foi possível determinar se a maior e/ou a menor dose do inoculante aplicado em pós emergência resultaria nesse melhor desempenho. Assim, para melhor averiguar que a reinoculação suplementar via cobertura, em complementação à inoculação via semente, pode ser uma técnica que demonstra resultados promissores para a otimização da FBN na cultura do feijoeiro, assim como relatado por Sousa et al. (2022b); seguiu-se com os experimentos de campo utilizando-se a dose de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido aplicado em pós-emergência da cultura.

Em suma, os resultados deste estudo em casa de vegetação fornecem informações valiosas sobre a resposta de diferentes cultivares de feijão-comum à inoculação com *Rhizobium* e à fertilização nitrogenada. Eles reforçam a importância da seleção de cultivares e da otimização das práticas de inoculação para maximizar a

FBN e a produtividade da cultura, ao mesmo tempo em que destacam o papel da competição com o N-mineral na regulação da nodulação. A necessidade de considerar as interações genótipo-ambiente é evidente, e a pesquisa futura deve focar na validação desses achados em condições de campo e na identificação de estirpes de *Rhizobium* ainda mais eficientes e competitivas para o feijão-comum.

4.2 Resposta da cv. TAA Dama à reinoculação em diferentes ambientes

Considerando os quatro experimentos de campo com a cv. TAA Dama (São Manuel I e II; Botucatu I e II), os resultados obtidos para nodulação no estágio R6 apresentaram efeito significativo somente para o fator experimento, no qual os experimentos de Botucatu II e São Manuel II resultaram nas maiores médias para o número de nódulos (NN) e matéria seca por nódulo (MSPN), respectivamente (Tabela 10). Em R8, a inoculação na semente e a inoculação + reinoculação foram os tratamentos com maiores médias para o NN e matéria seca de nódulos (MSN). No geral, a fertilização com N-mineral, seja ela com 60 ou 120 kg ha⁻¹ de N, resultaram nos menores valores para as variáveis citadas, o que sugere uma supressão na nodulação pelo N-mineral. Os incrementos no NN e MSN para os tratamentos inoculados, quando comparados com a fertilização com N-mineral, foram de 42 e 45% a mais de NN e MSN, respectivamente.

Tabela 10 – Teste de médias e resumo da análise de variância para o número de nódulos (NN), matéria seca de nódulos (MSN) e matéria seca por nódulo (MSPN) de feijão-comum (cv. TAA Dama) nos estádios fenológicos R6 e R8 submetido a diferentes formas para fornecimento de N, em quatro experimentos de campo

Tratamento	NN	MSN	MSPN
	nº planta ⁻¹	mg planta ⁻¹	mg nódulo ⁻¹
Estádio R6			
Experimentos (E)			
São Manuel I	33,42 b ⁽¹⁾	46,77 a	1,45 ab
São Manuel II	26,59 b	48,94 a	2,55 a
Botucatu I	40,23 ab	44,62 a	1,10 b
Botucatu II	56,27 a	47,49 a	1,52 ab
Fornecimento de N (FN)			
Controle	37,04 a	40,76 a	1,49 a
Inoculação na semente	46,01 a	49,74 a	1,26 a
Inoculação + reinoculação	42,88 a	49,93 a	1,55 a
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	37,64 a	54,05 a	2,20 a
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	32,06 a	40,30 a	1,76 a
Fonte de Variação	$P > F$		
E	<0,001	0,879	0,013
FN	0,451	0,097	0,423
E × FN	0,995	0,859	0,868
CV (%)	57,5	36,2	85,5
Estádio R8			
Experimentos (E)			
São Manuel I	36,80 a ⁽¹⁾	41,80 a	1,14 a
São Manuel II	39,22 a	43,14 a	1,06 a
Botucatu I	34,38 a	40,45 a	1,21 a
Botucatu II	46,01 a	42,54 a	1,10 a
Fornecimento de N (FN)			
Controle	38,68 ab	41,01 b	1,12 a
Inoculação na semente	52,76 a	56,37 a	1,13 a
Inoculação + reinoculação	48,93 a	51,60 ab	1,12 a
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	33,85 ab	36,81 bc	1,09 a
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	21,26 b	24,11 c	1,17 a
Fonte de Variação	$P > F$		
E	0,324	0,950	0,293
FN	<0,001	<0,001	0,929
E × FN	0,998	0,937	0,532
CV (%)	52,7	36,1	22,6

⁽¹⁾Médias seguidas da mesma letra, na coluna e dentro de cada fator e época de avaliação, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Controle: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral 60 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

Nos experimentos conduzidos em Botucatu, as maiores médias para o índice relativo de clorofila (IRC) foram obtidas no experimento II no estágio R6 (Tabela 11). Ainda em R6, os valores de IRC foram iguais, estatisticamente, quando as plantas de feijão-comum foram submetidas à inoculação na semente e a fertilização com N-mineral. Em R8, cuja interação entre os fatores foi significativa, o IRC foi consistentemente maior em São Manuel II, em relação aos demais experimentos, sem diferença entre as formas de fornecimento de N (Figura 8). Nos experimentos São Manuel I e Botucatu I, o N-mineral, especialmente a dose de 120 kg ha^{-1} , teve um desempenho superior às demais formas para fornecimento de N. Já em Botucatu II, o tratamento com inoculação + reinoculação proporcionou os maiores valores de IRC, porém diferindo apenas no tratamento com inoculação apenas via semente. O experimento Botucatu I apresentou os maiores valores de MSPA das plantas de feijão-comum, em ambos os estádios (Tabela 11). Ao passo que os maiores valores de MSPA, foram obtidos para as plantas fertilizadas com N-mineral, com resultado de $1785,3$ e $4676,6 \text{ kg ha}^{-1}$ nos estádios R6 e R8, respectivamente, quase duas vezes superior ao tratamento controle. Destaca-se, no entanto, que os tratamentos com inoculação de rizóbio via semente e, principalmente, com inoculação + reinoculação em cobertura, proporcionaram valores de MSPA intermediários, ou seja, foram superiores ao controle, mas inferiores os tratamentos com N-mineral, especialmente na dose de 120 kg ha^{-1} .

As variáveis teor de N na parte aérea (TN) e teor de N na folha diagnose (TNF), avaliados no estágio R6, apresentaram interação significativa para os fatores estudados (experimentos $\times$ fornecimento de N) (Figura 9). Em Botucatu I, não houve diferença entre as formas para fornecimento de N para o TN e o TNF. Nos demais experimentos, os maiores resultados foram obtidos com fertilização de N-mineral com 120 kg ha^{-1} de N (Figura 9A e 9B). Vale destacar que no experimento Botucatu II, a inoculação + reinoculação resultou em TN elevado (47 g kg^{-1}), não diferindo do tratamento com N-mineral na dose de 120 kg ha^{-1} (50 g kg^{-1}) (Figura 9A). No estágio R8, o TN e TNF foram superiores nos experimentos conduzidos em Botucatu, quando comparados com os conduzidos em São Manuel (Tabela 11). Quanto às formas para fornecimento de N, a fertilização com N-mineral resultou nos maiores valores de TNF, diferindo dos tratamentos com inoculação ou inoculação + reinoculação. Não houve efeito das formas de fornecimento de N no TN.

A quantidade de N total acumulado na parte aérea (NAPA), que apresentou interação significativa em R6, foi superior com a fertilização de N-mineral na dose de 120 kg ha⁻¹ de N, especialmente nos dois experimentos conduzidos em Botucatu (Botucatu I – 116 kg ha⁻¹; Botucatu II – 96 kg ha⁻¹) (Figura 9C). Nos experimentos de São Manuel, a adubação mineral também proporcionou valores de NAPA superiores, porém sem diferir entre as doses. Em R8, a NAPA foi superior nos experimentos conduzidos em Botucatu, quando comparados com os conduzidos em São Manuel; e a fertilização com N-mineral resultou no maior incremento de NAPA quando comparado ao controle, com um aumento de 151% na referida variável (Tabela 11).

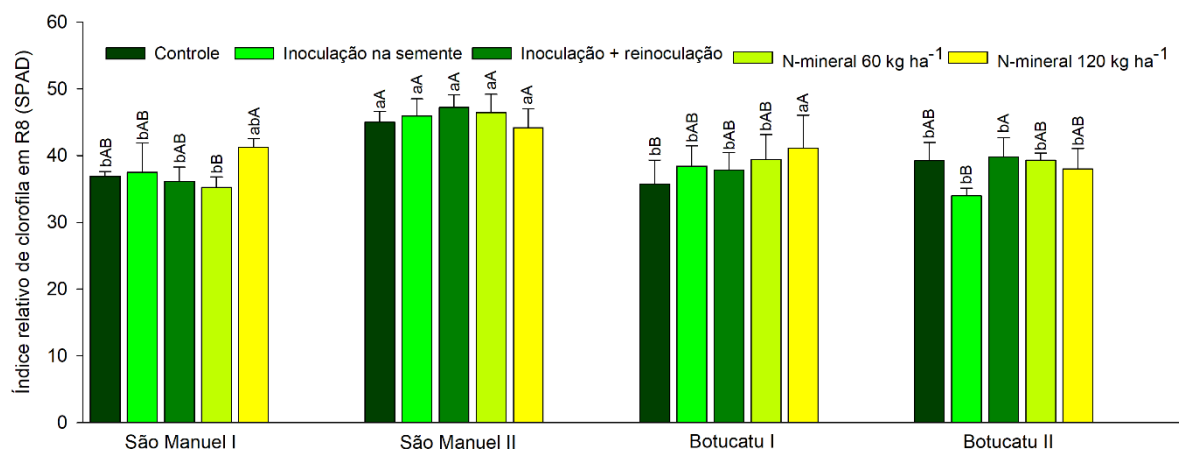
Em todos os experimentos e em ambos os estádios de avaliação, os tratamentos com inoculação, especialmente combinada com reinoculação em cobertura, proporcionaram valores intermediários de NAPA (Tabela 11; Figura 9C). Estes resultados indicam que, embora a inoculação com rizóbio seja eficaz na promoção da nodulação e FBN, a aplicação de N-mineral pode, em certas condições, levar a um maior acúmulo de biomassa e N na parte aérea da planta, especialmente em doses mais elevadas. Isso pode ser atribuído à disponibilidade imediata de N para a planta, que pode ser mais rapidamente assimilado e utilizado para o crescimento vegetativo em comparação com o N fixado biologicamente, que requer a formação e manutenção dos nódulos. No entanto, a sustentabilidade e o custo-benefício em longo prazo da FBN são superiores, pois reduzem a necessidade de insumos externos e minimizam o impacto ambiental associado à produção e uso de fertilizantes nitrogenados.

Tabela 11 – Teste de médias e resumo da análise de variância para o índice relativo de clorofila (IRC), matéria seca da parte aérea (MSPA), teor de N na parte aérea (TN), teor de N na folha diagnose (TNF) e quantidade de N total acumulado na parte aérea (NAPA) de feijão-comum (cv. TAA Dama) nos estádios fenológicos R6 e R8 submetido a diferentes formas para fornecimento de N em quatro experimentos de campo

Tratamento	IRC	MSPA	TN	TNF	NAPA
	SPAD	kg ha ⁻¹	g kg ⁻¹		kg ha ⁻¹
Estádio R6					
Experimento (E)					
São Manuel I	38,50 c ⁽¹⁾	1201,81 b	29,54 c	29,54 b	35,75 c
São Manuel II	43,74 b	1167,61 b	32,47 b	32,47 b	30,58 c
Botucatu I	49,75 a	1560,15 a	37,16 a	37,73 a	72,60 a
Botucatu II	47,87 a	1330,14 ab	38,55 a	38,55 a	55,47 b
Fornecimento de N (FN)					
Controle	41,92 b	988,05 c	32,10 b	31,67 b	30,82 d
Inoculação na semente	45,80 a	1072,18 c	32,35 b	31,86 b	37,28 cd
Inoculação + reinoculação	44,40 ab	1232,87 bc	32,42 b	33,16 b	44,53 bc
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	45,51 ab	1496,20 ab	34,31 b	34,91 b	52,33 b
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	47,18 a	1785,32 a	40,97 a	41,26 a	78,06 a
Fonte de Variação	<i>P > F</i>				
E	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
FN	0,004	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
E × FN	0,773	0,114	0,003	0,019	0,007
CV (%)	8,5	22,7	13,2	9,74	21,2
Estádio R8					
Experimento (E)					
São Manuel I	37,39 b ⁽¹⁾	2924,10 b	24,83 b	24,41 c	70,78 b
São Manuel II	45,75 a	2989,56 b	24,67 b	26,56 c	73,36 b
Botucatu I	38,50 b	4374,65 a	30,87 a	42,63 a	134,81 a
Botucatu II	38,06 b	3676,03 ab	30,70 a	37,27 b	116,11 a
Fornecimento de N (FN)					
Controle	39,21 a	2288,90 d	24,64 a	32,24 ab	55,58 c
Inoculação na semente	38,95 a	2979,02 cd	28,90 a	31,37 b	86,02 bc
Inoculação + reinoculação	40,24 a	3360,16 bc	28,29 a	31,43 b	95,37 b
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	40,10 a	4150,79 ab	27,69 a	32,98 ab	117,32 ab
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	41,13 a	4676,55 a	29,30 a	35,56 a	139,54 a
Fonte de Variação	<i>P > F</i>				
E	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
FN	0,165	<0,001	0,177	0,014	<0,001
E × FN	0,011	0,876	0,320	0,895	0,694
CV (%)	6,7	29,2	20,8	11,4	38,8

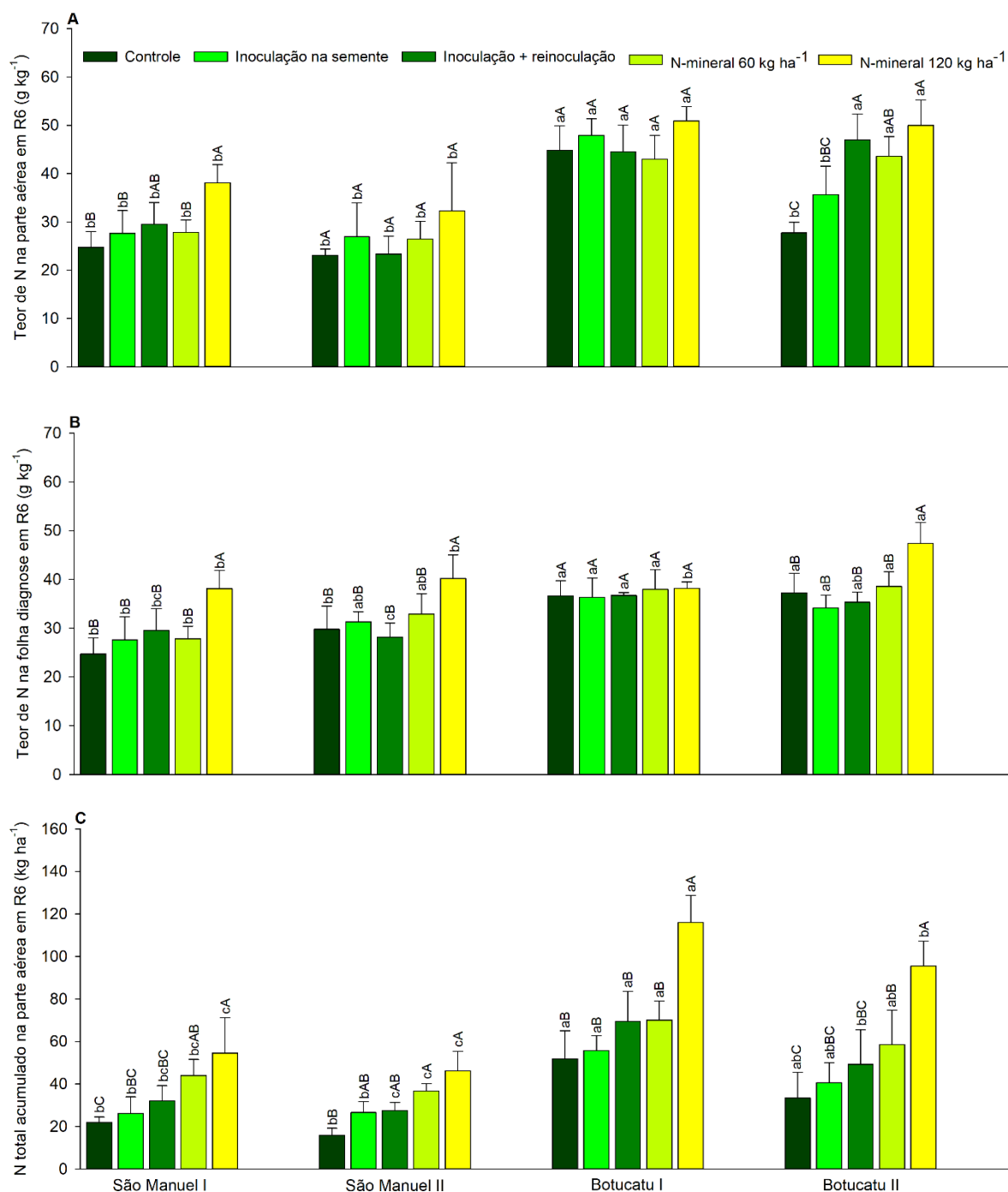
⁽¹⁾Médias seguidas da mesma letra, na coluna e dentro de cada fator e época de avaliação, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Controle: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral 60 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

Figura 8 – Desdobramento entre experimentos (São Manuel I e II, Botucatu I e II) e as diferentes formas para fornecimento de N, para a variável índice relativo de clorofila do feijão-comum no estágio fenológico R8. Letras minúsculas comparam os experimentos dentro de cada forma de fornecimento de N, enquanto letras maiúsculas comparam as formas de fornecimento de N dentro de cada experimento com valor de $p < 0,05$ de acordo com o teste de Tukey



Controle: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral 60 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

Figura 9 – Desdobramento entre experimentos (São Manuel I e II, Botucatu I e II) e as diferentes formas para fornecimento de N, para a variável teor de N na parte aérea (A), teor de N na folha diagnose (B) e quantidade de N total acumulado na parte aérea (C) no estágio fenológico R6. Letras minúsculas comparam os experimentos dentro de cada forma de fornecimento de N, enquanto letras maiúsculas comparam as formas de fornecimento de N dentro de cada experimento com valor de $p < 0,05$ de acordo com o teste de Tukey



Controle: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha^{-1} do inoculante líquido; N-mineral 60 kg ha^{-1} : fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha^{-1} de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral 120 kg ha^{-1} : fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha^{-1} de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

Os experimentos conduzidos em Botucatu, especialmente Botucatu II, resultaram em médias superiores para as variáveis número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV) e produtividade de grãos (PROD) (Tabela 12). Quanto as formas para fornecimento de N, os maiores resultados para NVP e PROD foram obtidos com a fertilização de N-mineral na dose de 120 kg ha^{-1} de N. Em relação ao controle, o tratamento com N-mineral (120 kg ha^{-1} de N), proporcionou incremento de pelo menos 5 unidades no NVP e 1.200 kg ha^{-1} na PROD do feijão-comum. O tratamento com inoculação + reinoculação proporcionou valores de NVP e PROD superiores ao controle e equivalentes aquele com N-mineral na dose de 60 kg ha^{-1} .

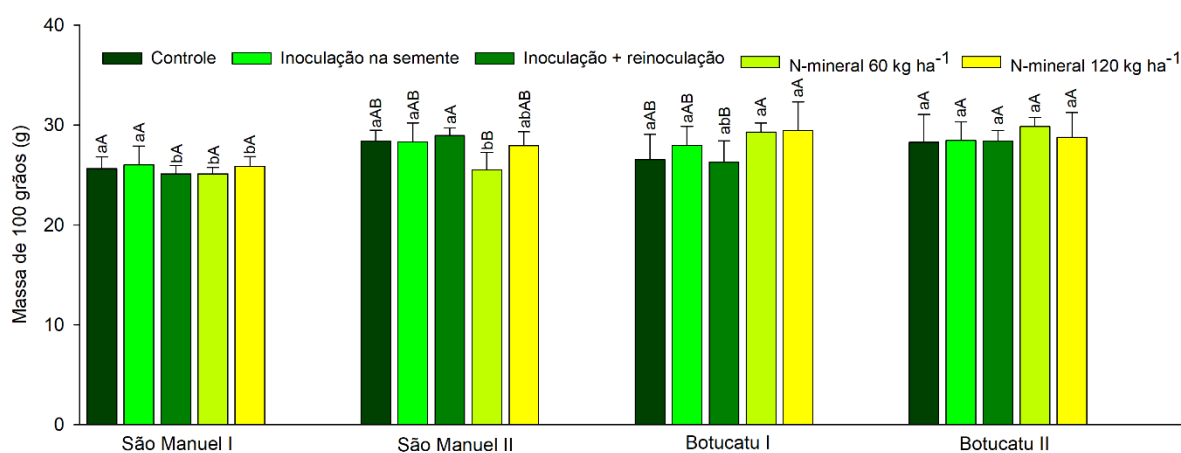
Para a massa de 100 grãos (M100G) houve interação significativa entre os fatores estudados (Tabela 12). Há influência do local (experimento) na resposta da M100G às diferentes formas de fornecimento de N, ou seja, São Manuel e Botucatu se comportaram de maneiras distintas (Figura 10). A M100G foi superior em todos os tratamentos no experimento conduzido em Botucatu II. Já em Botucatu I, o melhor resultado foi obtido nas condições fertilizadas com N-mineral, nas doses de 60 e 120 kg ha^{-1} de N, que resultou em 29 g para M100G, em ambos os tratamentos. Nos experimentos conduzidos em Botucatu (I e II), as formas de fornecimento de N (incluindo inoculação e N-mineral) não resultaram em um aumento estatisticamente significativo na M100G em comparação com o controle (Figura 10). Isso pode indicar que o solo de Botucatu já possuía N suficiente para o desenvolvimento da cultura, ou que outros fatores limitantes influenciaram, impedindo que o N adicional se traduzisse em maior massa de grãos. Vale ressaltar que nos experimentos conduzidos em São Manuel (I e II), os tratamentos que receberam algum tipo de inoculação foram tão eficientes quanto os demais. Os melhores resultados para M100G foi obtido no tratamento que recebeu a reinoculação em pós-emergência da cultura (29 g).

Tabela 12 – Teste de médias e resumo da análise de variância para a população final de plantas (PFP), número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), massa de 100 grãos (M100G) e produtividade de grãos (PROD) de feijão-comum (cv. TAA Dama) no estágio fenológico R9 submetido a diferentes formas para fornecimento de N em quatro experimentos de campo

Tratamento	PFP	NVP	NGV	M100G	PROD
	planta ha ⁻¹	nº planta ⁻¹	nº vagem ⁻¹	g	kg ha ⁻¹
Experimento					
São Manuel I	204814,82 a ⁽¹⁾	9,68 b	4,37 bc	25,56 b	2097,4 c
São Manuel II	202314,81 a	8,94 b	4,14 c	27,81 a	1835,7 c
Botucatu I	211629,63 a	13,78 a	4,71 b	27,92 a	3466,0 b
Botucatu II	211277,78 a	14,25 a	5,16 a	28,74 a	4208,1 a
Fornecimento de N (FN)					
Controle	211396,60 a	8,88 c	4,53 a	27,21 a	2326,9 c
Inoculação na semente	205601,85 a	11,35 b	4,61 a	27,68 a	2776,3 bc
Inoculação + reinoculação	210856,48 a	11,38 b	4,62 a	27,18 a	2745,4 bc
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	206157,41 a	12,08 b	4,58 a	27,45 a	3038,7 ab
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	203533,95 a	14,61 a	4,62 a	28,00 a	3621,9 a
Fonte de Variação	$P > F$				
E	0,329	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
FN	0,728	<0,001	0,977	0,498	<0,001
E × FN	0,802	0,409	0,945	0,012	0,528
CV (%)	9,2	17,3	9,8	5,4	24,3

⁽¹⁾Médias seguidas da mesma letra, na coluna e dentro de cada fator, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Controle: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral 60 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

Figura 10 – Desdobramento entre experimentos (São Manuel I e II, Botucatu I e II) e as diferentes formas para fornecimento de N, para a variável massa de 100 grãos do feijão-comum (cv. TAA Dama) no estágio fenológico R9. Letras minúsculas comparam os experimentos dentro de cada forma de fornecimento de N, enquanto letras maiúsculas comparam as formas de fornecimento de N dentro de cada experimento com valor de $p < 0,05$ de acordo com o teste de Tukey



Controle: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral 60 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

Para as variáveis teor de N nos grãos (TNG) e teor de proteína bruta nos grãos (TPG), foi observada interação significativa entre experimentos e as formas para fornecimento de N (Tabela 13). Os maiores resultados para essas variáveis foram proporcionados pelo tratamento controle em São Manuel I (TNG = 48 g kg⁻¹; TPG = 302 g kg⁻¹), no tratamento com inoculação + reinoculação em São Manuel II (TNG = 51 g kg⁻¹; TPG = 318 g kg⁻¹) e no tratamento com 120 kg ha⁻¹ de N no experimento conduzido em Botucatu I (TNG = 51 g kg⁻¹; TPG = 320 g kg⁻¹) (Figuras 11A e 11B). Em Botucatu II, não houve diferença estatística entre as formas para fornecimento de N para ambas as variáveis. Fica evidente que a resposta do TNG e TPG varia consideravelmente entre os experimentos (locais/anos), o que é esperado devido às diferentes condições edafoclimáticas. A dose de 120 kg ha⁻¹ de N-mineral geralmente tendeu a resultar em TNG e TPG mais elevados ou comparáveis às formas de inoculação, especialmente em Botucatu.

A produtividade de proteína bruta (PPB), que teve resultados significativos para os fatores isolados, resultou em médias superiores para os experimentos conduzidos em Botucatu (Tabela 13). A fertilização com 120 kg ha⁻¹ N-mineral foi o tratamento

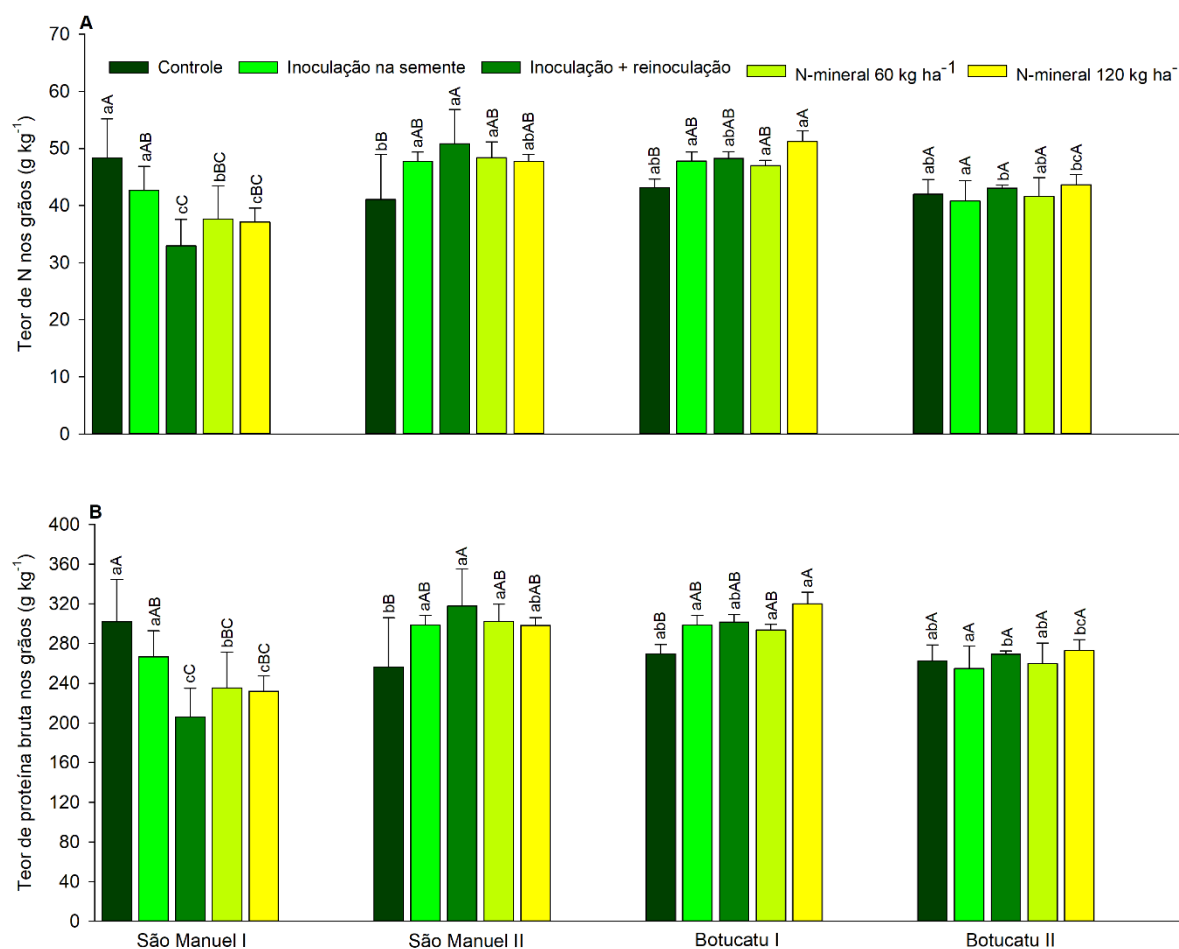
com os maiores resultados obtidos na referida variável. Quando comparado com o controle, houve um incremento de 340 kg ha⁻¹ na PPB no tratamento fertilizado com N-mineral. Vale destacar que, apesar de não diferir estatisticamente, os tratamentos com inoculação e inoculação + reinoculação, proporcionaram valores de PPB em média 20,3% superiores ao controle. Tais resultados é um reflexo dos obtidos anteriormente, onde os experimentos de Botucatu e a maior dose de N-mineral possibilitaram os maiores resultados para as variáveis relacionadas (PROD e TPG) e, conseqüentemente, isto refletiu nos valores de PPB (Tabelas 12; 13 e Figura 11B).

Tabela 13 – Teste de médias e resumo da análise de variância para o teor de N nos grãos (TNG), teor de proteína bruta nos grãos (TPG) e a produtividade de proteína bruta (PPB) de feijão-comum (cv. TAA Dama) submetido a diferentes formas para fornecimento de N em quatro experimentos de campo

Tratamento	TNG	TPG	PPB
	g kg ⁻¹		kg ha ⁻¹
Experimento			
São Manuel I	39,74 b ⁽¹⁾	248,42 b	445,7 b
São Manuel II	47,14 a	294,63 a	471,0 b
Botucatu I	47,46 a	296,66 a	899,0 a
Botucatu II	42,20 b	263,80 b	970,7 a
Fornecimento de N (FN)			
Controle	43,62 a	272,65 a	550,7 b
Inoculação na semente	44,74 a	279,63 a	669,9 b
Inoculação + reinoculação	43,78 a	273,64 a	655,3 b
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	43,64 a	272,75 a	712,6 b
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	44,91 a	280,73 a	894,4 a
Fonte de Variação	<i>P > F</i>		
E	<0,001	<0,001	<0,001
FN	0,769	0,768	<0,001
E × FN	<0,001	<0,001	0,249
CV (%)	8,5	8,5	23,8

⁽¹⁾Médias seguidas da mesma letra, na coluna e dentro de cada fator, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Controle: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral 60 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

Figura 11 – Desdobramento entre experimentos (São Manuel I e II, Botucatu I e II) e as diferentes formas para fornecimento de N, para as variáveis teor de N nos grãos (A) e teor de proteína bruta nos grãos (B) do feijão-comum cv. TAA Dama. Letras minúsculas comparam os experimentos dentro de cada forma de fornecimento de N, enquanto letras maiúsculas comparam as formas de fornecimento de N dentro de cada experimento com valor de $p < 0,05$ de acordo com o teste de Tukey



Controle: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral 60 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

No geral, independente do estágio fenológico da avaliação, os resultados para a nodulação (NN), as características envolvidas com N na planta e matéria seca (IRC, TN, TNF, MSPA e NAPA), os componentes agronômicos (NVP, NGV e PROD) e a PPB; foram mais expressivos nos experimentos conduzidos em Botucatu. Isto pode ter sido influenciado pelas condições mais favoráveis de Botucatu, como o maior aporte de palhada, teor de argila e matéria orgânica, diferentemente das condições encontradas em São Manuel (Tabela 3). Em especial a matéria orgânica, quando

adequada seu teor no solo, desempenha um papel importante na melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e, conseqüentemente, na melhoria ou manutenção dos sistemas de cultivo (Maitra *et al.*, 2020; Nyawade *et al.*, 2019; Fageria, 2012; Mikha e Rice, 2004), o que é consistente com os resultados positivos encontrados para os experimentos conduzidos em Botucatu.

Algumas variáveis apresentaram interação significativa entre os locais e os tratamentos, a exemplo do TN avaliado no estágio R6 em Botucatu II, no qual os tratamentos com N-mineral na dose de 120 kg ha⁻¹ de N e a inoculação + reinoculação, não se diferiram estatisticamente. Porém, este resultado foi especialmente para a variável citada, onde as demais variáveis avaliadas que apresentaram interação significativa, foram superiores nos experimentos conduzidos em Botucatu (I e II) no tratamento com N-mineral na dose de 120 kg ha⁻¹ de N. Isto demonstra que, mesmo a inoculação apresentando um potencial efeito para suprir a demanda de N da cultura de feijão, ainda assim a fertilização com N-mineral se sobressai em termos de teor e acúmulo de N e, conseqüentemente, a produtividade de grãos quando se visa a obtenção de elevados patamares de produção.

Os resultados obtidos com a cv. TAA Dama sob distintas formas de fornecimento de N, confirmam que a inoculação com *Rhizobium* é eficaz na promoção da nodulação e na contribuição para o balanço de N da planta, conforme demonstrado pelo aumento significativo no NN e MSN nos tratamentos inoculados em comparação com a fertilização N-mineral. Por outro lado, a fertilização com N-mineral, especialmente em doses mais elevadas, demonstrou ser mais eficiente em promover o TN e NAPA em estádios avançados de desenvolvimento. Embora a FBN seja uma via sustentável para o fornecimento de N, a absorção direta de N-mineral pode resultar em um crescimento vegetativo mais rápido e um maior acúmulo de biomassa em curto prazo.

Tais resultados aqui apresentados estão de acordo com o que é relatado por Sousa *et al.* (2022a), que ao estudarem a eficiência da inoculação com *Rhizobium* no feijão-comum, os autores observaram que tal prática pode aumentar consistentemente a nodulação das plantas e os componentes agrônômicos. No entanto, em comparação com a fertilização com N-mineral, a inoculação rizobiana não tem a mesma eficiência em aumentar o NVP e a PROD do feijão-comum. Alguns estudos têm relatado que a inoculação do feijoeiro-comum com rizóbios, ou a inoculação + reinoculação, resultaram em valores de PROD iguais e/ou superiores quando comparado ao tratamento com fertilizante nitrogenado (Almeida *et al.*, 2022;

Sousa *et al.*, 2022b; Teixeira *et al.*, 2022; Cardoso e Ferreira, 2021; Pacheco *et al.*, 2020; Souza e Ferreira, 2017; Barros *et al.*, 2016). Todavia, neste trabalho, não foi possível evidenciar tal efeito nos quatros experimentos conduzidos com a cv. TAA Dama.

4.3 Crescimento, acúmulo de nitrogênio e produtividade de três cultivares de feijoeiro-comum em resposta à reinoculação

Quando avaliadas no estágio R6, as variáveis relacionadas à FBN (número de nódulos – NN, matéria seca de nódulos – MSN e matéria seca por nódulo – MSPN) foram influenciadas pelas cultivares estudadas e/ou pelas diferentes formas para fornecimento de N (Tabela 14). No experimento Botucatu I, as cultivares IPR Campos Gerais e TAA Dama expressaram um maior potencial para o NN e MSN, quando comparadas a IPR Andorinha. A diferença média foi de 9,0 unidades para NN e 11,0 mg para MSN quando comparadas as cultivares IPR Campos Gerais e TAA Dama com a IPR Andorinha. Em Botucatu II, o mesmo resultado foi observado para a variável MSN, no qual as cultivares IPR Campos Gerais e TAA Dama sobressaíram a IPR Andorinha. A diferença média entre as duas cultivares que expressaram os melhores resultados para a IPR Andorinha foi de 10,8 mg.

O fato de diferentes cultivares terem características de nodulação distintas é um resultado que pode ser influenciado pelos genótipos de feijoeiro-comum (Rodiño *et al.*, 2011; Andraus *et al.*, 2016). A eficiência da FBN é uma característica complexa, influenciada por fatores genéticos da planta hospedeira e pela compatibilidade com as estirpes de rizóbio (Leal *et al.*, 2019; Wilker *et al.*, 2019). Em vista disso, os melhores resultados atribuídos as cultivares IPR Campos Gerais e TAA Dama, as quais possuem hábito de crescimento indeterminado do tipo II e III, respectivamente, estaria associado ao maior potencial genético destas cultivares na formação e atividade de nódulos, o que caracteriza um desempenho superior da FBN (Fonseca *et al.*, 2013). Resultados semelhantes a este relatado foram encontrados por Pacheco *et al.* (2020), onde as variáveis de nodulação também foram superiores em cultivares de feijão-comum com crescimento do tipo II e III; e as menores médias para essas variáveis foram encontradas na cv. BRS Radiante, uma cultivar tipo I de ciclo curto, semelhante a IPR Andorinha.

Em relação as diferentes formas para fornecimento de N, o tratamento com N-mineral na dose de 120 kg ha⁻¹ resultou nas menores médias para NN, MSN e MSPN nos experimentos de Botucatu I e II nos estádios fenológicos R6 e R8 do feijão-comum (Tabelas 14 e 15). Quando comparado o valor médio dos tratamentos que receberam algum tipo de inoculação (inoculação na semente ou inoculação + reinoculação) com o tratamento fertilizado, obteve-se um incremento de pelo menos 36% para NN, 55% para MSN e 41% para MSPN. A inibição da nodulação devido às altas doses da fertilização com N-mineral já é bem conhecida na literatura (Sousa *et al.*, 2022a; Pacheco *et al.*, 2020; Glodowska e Wozniak, 2019), uma vez que a planta prioriza a absorção de N disponível no solo em detrimento da FBN, um processo energeticamente custoso. Isto explica estes resultados para a baixa nodulação no tratamento que recebeu fertilização com N-mineral.

A MSN e a MSPN no estágio R8 do experimento Botucatu I foram influenciadas significativamente pela interação entre os fatores estudados (Tabela 15). Para a cv. TAA Dama, os maiores resultados para MSN foram proporcionados pelos tratamentos com inoculação e inoculação + reinoculação, com valores de 49,40 mg e 51,43 mg, respectivamente (Figura 12A). No entanto, a MSPN na cv. TAA Dama não apresentou diferença estatística entre as formas para fornecimento de N (Figura 12B). A IPR Andorinha também não apresentou diferença estatística entre as formas para fornecimento de N em ambas as variáveis estudadas. A cv. IPR Campos Gerais obteve os maiores valores para MSN no tratamento com inoculação + reinoculação e para MSPN no tratamento com 60 kg ha⁻¹ de N, que diferiu do tratamento do a maior dose de N-mineral. Os menores valores para as referidas variáveis foram observados nos tratamentos com N-mineral na maior dose utilizada (120 kg ha⁻¹). No geral, A MSN e a MSPN foram 75 e 11% superiores nos tratamentos inoculados quando comparados com os tratamentos que recebeu N-mineral (Figura 12A e 12B).

Embora a MSPN na TAA Dama não tenha apresentado diferença estatística entre as formas de fornecimento de N, a IPR Campos Gerais obteve os maiores valores para MSN e MSPN nos tratamentos inoculados. A IPR Andorinha, por sua vez, mostrou-se menos responsiva às diferentes formas de N para as variáveis de nodulação. Esses dados sugerem que a cv. TAA Dama possui uma maior responsividade à inoculação, o que pode ser atribuído a uma melhor interação simbiótica com as estirpes de *Rhizobium* utilizadas (Samago *et al.*, 2018; Argaw e Muleta, 2017).

Mesmo não apresentado diferença estatística, os valores médios das variáveis de nodulação, no estágio R6 foi maior no tratamento controle que nos tratamentos inoculados, indicando uma alta populações de rizóbios nativos no solo. Isto, segundo Brito et al. (2015) e Pacheco et al. (2020), representa uma barreira de competição ao estabelecimento de linhagens introduzidas (inoculantes comerciais com cepas selecionadas). Mwenda et al. (2023) destacam que a competição por nodulação entre estirpes selecionadas de *Rhizobium* e rizóbios nativos do solo, que podem ser ineficazes na fixação de N₂, é um fator crítico que pode limitar a resposta à inoculação. Vale destacar que, mesmo tendo essa possibilidade de barreira para o estabelecimento das cepas inoculadas via semente e/ou aplicação em pós-emergência (reinoculação), os tratamentos inoculados apresentaram uma eficiência competitiva pelo sítio de infecção para nodular o feijão-comum, fato este evidenciado pelo resultado que não diferiu estatisticamente do tratamento controle, sem grandes interferências na nodulação da cultura (Sousa *et al.*, 2022b; Vargas *et al.*, 2000).

Tabela 14 – Teste de médias e resumo da análise de variância para o número de nódulos (NN), matéria seca de nódulos (MSN), matéria seca por nódulo (MSPN) de cultivares de feijão-comum, no estágio fenológico R6, submetidas a diferentes formas para fornecimento de N, em dois experimentos de campo conduzidos em Botucatu

Tratamento	NN	MSN	MSPN
	nº planta ⁻¹	mg planta ⁻¹	mg nódulo ⁻¹
Botucatu I			
Cultivar (C)			
IPR Andorinha	29,44 b ⁽¹⁾	30,15 b	0,94 a
IPR Campos Gerais	37,39 a	37,77 ab	0,96 a
TAA Dama	40,23 a	44,61 a	1,10 a
Fornecimento de N (FN)			
Controle	40,94 a	45,12 a	1,10 a
Inoculação na semente	37,53 a	41,32 a	1,08 a
Inoculação + reinoculação	35,35 a	38,43 a	1,09 a
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	37,82 a	37,03 ab	0,97 ab
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	26,80 b	25,66 b	0,77 b
Fonte de Variação	<i>P > F</i>		
C	<0,001	<0,001	0,092
FN	<0,002	<0,001	0,010
C × FN	0,431	0,388	0,205
CV (%)	19,7	27,4	24,8
Botucatu II			
Cultivar (C)			
IPR Andorinha	40,64 a ⁽¹⁾	33,16 b	1,45 a
IPR Campos Gerais	47,46 a	40,50 ab	1,39 a
TAA Dama	56,27 a	47,48 a	1,52 a
Fornecimento de N (FN)			
Controle	57,16 a	47,66 a	1,50 ab
Inoculação na semente	54,10 a	45,45 a	1,57 a
Inoculação + reinoculação	51,97 ab	41,78 ab	1,48 ab
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	47,35 ab	39,51 ab	1,54 ab
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	30,04 b	27,50 b	1,17 b
Fonte de Variação	<i>P > F</i>		
C	0,063	0,004	0,453
FN	0,019	0,004	0,028
C × FN	0,860	0,678	0,565
CV (%)	42,3	31,9	21,9

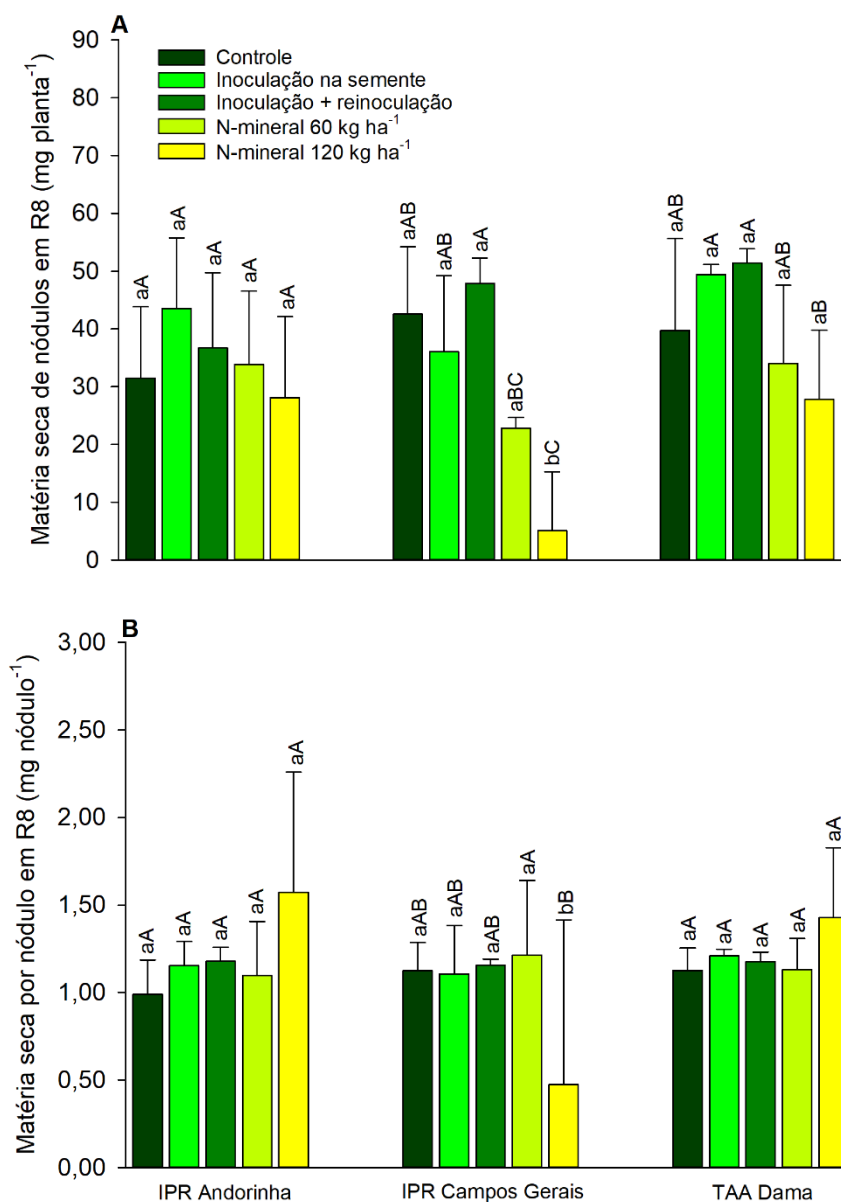
⁽¹⁾Médias seguidas da mesma letra, na coluna e dentro de cada fator e experimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Controle: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral 60 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

Tabela 15 – Teste de médias e resumo da análise de variância para o número de nódulos (NN), matéria seca de nódulos (MSN), matéria seca por nódulo (MSPN) de cultivares de feijão-comum no estágio fenológico R8 submetidas a diferentes formas para fornecimento de N em dois experimentos de campo conduzidos em Botucatu

Tratamento	NN	MSN	MSPN
	nº planta ⁻¹	mg planta ⁻¹	mg nódulo ⁻¹
Botucatu I			
Cultivar (C)			
IPR Andorinha	30,62 a ⁽¹⁾	34,72 ab	1,19 a
IPR Campos Gerais	27,86 a	30,87 b	1,01 a
TAA Dama	34,38 a	40,45 a	1,21 a
Fornecimento de N (FN)			
Controle	34,52 ab	37,90 ab	1,07 a
Inoculação na semente	37,21 ab	42,99 a	1,15 a
Inoculação + reinoculação	38,81 a	45,32 a	1,16 a
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	27,77 b	30,22 bc	1,14 a
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	16,41 c	20,32 c	1,15 a
Fonte de Variação	$P > F$		
C	0,070	0,012	0,164
FN	<0,001	<0,001	0,975
C × FN	0,122	0,028	0,034
CV (%)	28,0	27,7	31,6
Botucatu II			
Cultivar (C)			
IPR Andorinha	41,35 a ⁽¹⁾	36,68 a	0,98 a
IPR Campos Gerais	40,57 a	33,98 a	1,15 a
TAA Dama	46,01 a	42,54 a	1,10 a
Fornecimento de N (FN)			
Controle	46,26 a	39,45 ab	0,96 a
Inoculação na semente	50,54 a	43,88 ab	1,07 a
Inoculação + reinoculação	55,87 a	48,84 a	1,06 a
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	37,12 ab	32,75 bc	1,43 a
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	23,41 b	23,75 c	0,85 a
Fonte de Variação	$P > F$		
C	0,523	0,056	0,741
FN	<0,001	<0,001	0,369
C × FN	0,680	0,153	0,389
CV (%)	38,0	29,5	66,2

⁽¹⁾Médias seguidas da mesma letra, na coluna e dentro de cada fator e experimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Controle: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral 60 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

Figura 12 – Desdobramento entre cultivares e as diferentes formas para fornecimento de N, para as variáveis matéria seca de nódulos (A) e matéria seca por nódulo (B) do feijão-comum, no estágio fenológico R8, no experimento de campo conduzido em Botucatu I. Letras minúsculas comparam as cultivares dentro de cada forma de fornecimento de N, enquanto letras maiúsculas comparam as formas de fornecimento de N dentro de cada cultivar com valor de $p < 0,05$ de acordo com o teste de Tukey



Controle: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral 60 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

No estágio R6 em Botucatu I, a cv. TAA Dama teve maiores valores para o índice relativo de clorofila (IRC), matéria seca da parte aérea (MSPA), teor de N na parte aérea (TN) e quantidade de N total acumulado na parte aérea (NAPA) (Tabela 16).

Somente o teor de N na folha diagnose (TNF) foi superior na cv. IPR Campos Gerais neste mesmo estágio e experimento mencionado. Ainda em R6, no experimento de Botucatu II, a TAA Dama continuou expressando os maiores resultados para IRC e TN, já para MSPA e NAPA as cultivares IPR Campos Gerais e TAA Dama resultaram nos maiores valores médios para essas variáveis.

No estágio fenológico R8 em Botucatu I, comportamento semelhante dos resultados descritos anteriormente foi observada (Tabela 17). As cultivares IPR Campos Gerais e TAA Dama expressaram os melhores resultados para TN, TNF e NAPA. Exceção para o IRC, que foram observados maiores valores médios para as cultivares IPR Andorinha e TAA Dama. Independentemente de algumas exceções, no geral, as cultivares IPR Campos Gerais e TAA Dama sobressaíram em ambos os experimentos e estágios fenológicos avaliados (Tabela 16 e 17).

As cultivares IPR Campos Gerais e TAA Dama, que expressaram os melhores resultados para as variáveis relacionadas ao N e morfologia da cultura, apresentaram um desempenho vegetativo superior a IPR Andorinha, o que é condizente com o hábito e tipo de crescimento das cultivares (Hiolanda *et al.*, 2018). Ademais, tais cultivares possuem um potencial vegetativo e são mais responsivas e eficientes no uso de N, em relação a IPR Andorinha, o que também pode justificar a diferença nos resultados descritos anteriormente (Nunes *et al.*, 2021).

Quanto às diferentes formas para fornecimento de N, os tratamentos com aplicação de N-mineral interferiram significativamente as características avaliadas de IRC, MSPA, TN, TNF e NAPA (Tabela 16 e 17). Em ambos os experimentos e nos dois estágios fenológicos amostrados, a aplicação de 120 kg ha⁻¹ de N-mineral resultou nos maiores valores para essas variáveis. O tratamento que recebeu aplicação de 60 kg ha⁻¹ de N-mineral apresentou, também, resultados superiores, no entanto, não foi tão expressivo quanto a maior dose de N-mineral.

Quando comparados o tratamento com 120 kg ha⁻¹ de N-mineral e o tratamento controle, houve uma diferença de 3% para a variável IRC, 105% para MSPA e 123% para NAPA no estágio R6 em Botucatu I; em Botucatu II, este incremento foi da ordem de 87% para MSPA, 45% para TN, 32% para TNF e 170% para NAPA (Tabela 16). No estágio R8 em Botucatu I, o incremento para IRC foi de 15%, 69% para MSPA, 13% para TNF e 97% para NAPA, respectivamente, quando comparado o tratamento controle ao fertilizado com N-mineral na dose de 120 kg ha⁻¹. Seguindo este mesmo comparativo, em Botucatu II, houve uma diferença, na devida ordem, de 48 e 49%

para as variáveis MSPA e NAPA (Tabela 17). Em relação aos tratamentos inoculados (inoculação na semente e inoculação + reinoculação), não foram observados resultados expressivos para essas variáveis mencionadas, apesar deles terem proporcionado valores intermediários entre o controle e os tratamentos que receberam N-mineral para algumas variáveis.

Levando em consideração a exigência nutricional de N do feijoeiro-comum, é visível a responsividade da cultura as altas doses de N-mineral aplicado. Isso porque o nutriente está diretamente relacionado ao crescimento e desenvolvimento vegetal. O N é o nutriente requerido em maior quantidade pelas plantas e, geralmente, o nutriente mais limitante para a produtividade das culturas (Santos *et al.*, 2023; Holland *et al.*, 2018), incluindo o feijoeiro-comum. O N ainda participa dos processos de absorção iônica, fotossíntese, respiração, formação de proteínas e estimula o crescimento de raízes e parte aérea, dentre outras funções. Assim, a deficiência de N inibe, rapidamente, o crescimento e desenvolvimento vegetal (Gaudinier *et al.*, 2018; Taiz *et al.*, 2017; Fagan, 2011).

Como já mencionado anteriormente, o acréscimo das doses de N na cobertura diminuiu o número e a produção de nódulos em relação aos tratamentos inoculados, no entanto, isto não afetou o estado nutricional da planta, visto que o efeito compensatório da fertilização nitrogenada aumentou a produção de matéria seca, o teor e o acúmulo de N na parte aérea do feijoeiro, resultados igualmente relatados por Souza *et al.* (2011).

A interação entre os fatores estudados (cultivares × formas para fornecimento de N) foi significativo para as variáveis TN e IRC avaliados nos estádios R6 e R8, respectivamente, no experimento de Botucatu II (Tabelas 16 e 17). Para as três cultivares, maiores valores para as referidas variáveis foram obtidos no tratamento com N-mineral na dose de 120 kg ha⁻¹ (Figura 13). Vale destacar que quando a cv. TAA Dama foi inoculada com rizóbio + aplicação do inóculo em cobertura (reinoculação), o TN e o IRC não diferiu estatisticamente do tratamento com N-mineral (120 kg ha⁻¹). Provavelmente, por ser uma cultivar mais responsiva à inoculação, a cv. TAA Dama resultou em valores semelhantes aos obtidos no tratamento com adubação nitrogenada em termos de estado nutricional de N. Isso sugere que a TAA Dama, por ser mais responsiva à inoculação, pode atingir um estado nutricional de N comparável ao da adubação nitrogenada, o que é um indicativo de seu potencial para a redução da dependência de fertilizantes nitrogenados (Nogueira e Hungria, 2006).

Tabela 16 – Teste de médias e resumo da análise de variância para o índice relativo de clorofila (IRC), matéria seca da parte aérea (MSPA), teor de N na parte aérea (TN), teor de N na folha diagnose (TNF) e quantidade de N total acumulado na parte aérea (NAPA) de cultivares de feijão-comum no estágio fenológico R6 submetidas a diferentes formas para fornecimento de N em dois experimentos de campo conduzidos em Botucatu

Tratamento	IRC	MSPA	TN	TNF	NAPA
	SPAD	kg ha ⁻¹	g kg ⁻¹		kg ha ⁻¹
Botucatu I					
Cultivar (C)					
IPR Andorinha	46,23 b ⁽¹⁾	1232,89 b	43,15 ab	37,73 b	53,27 b
IPR Campos Gerais	43,53 c	1376,27 ab	41,84 b	42,37 a	57,02 b
TAA Dama	49,75 a	1560,15 a	46,22 a	37,16 b	72,60 a
Fornecimento de N (FN)					
Controle	46,11 ab	1001,09 c	41,50 a	38,29 a	41,65 c
Inoculação na semente	46,17 ab	1073,74 c	45,23 a	37,97 a	48,41 c
Inoculação + reinoculação	44,23 b	1194,12 c	44,12 a	39,14 a	52,55 bc
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	48,33 a	1630,06 b	42,43 a	40,13 a	69,31 b
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	47,67 ab	2049,85 a	45,41 a	39,90 a	92,88 a
Fonte de Variação	<i>P</i> > <i>F</i>				
C	<0,001	0,002	0,023	<0,001	0,001
FN	0,053	<0,001	0,237	0,671	<0,001
C × FN	0,752	0,076	0,655	0,644	0,147
CV (%)	7,4	27,5	11,3	11,0	26,3
Botucatu II					
Cultivar (C)					
IPR Andorinha	44,98 b ⁽¹⁾	986,63 b	37,41 b	39,90 a	36,46 b
IPR Campos Gerais	42,28 c	1320,03 a	36,50 b	40,39 a	49,13 a
TAA Dama	47,87 a	1330,14 a	40,78 a	38,55 a	55,47 a
Fornecimento de N (FN)					
Controle	44,86 a	950,15 c	31,24 c	36,68 b	29,55 c
Inoculação na semente	44,92 a	1046,91 bc	34,20 bc	36,71 b	36,72 bc
Inoculação + reinoculação	42,98 a	934,12 c	38,46 bc	36,13 b	36,65 bc
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	46,04 a	1353,20 b	38,53 b	40,18 b	52,31 b
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	46,42 a	1776,95 a	45,38 a	48,36 a	79,86 a
Fonte de Variação	<i>P</i> > <i>F</i>				
C	<0,001	0,002	0,009	0,326	<0,001
FN	0,086	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
C × FN	0,638	0,841	0,039	0,553	0,697
CV (%)	6,9	26,8	14,7	10,0	30,9

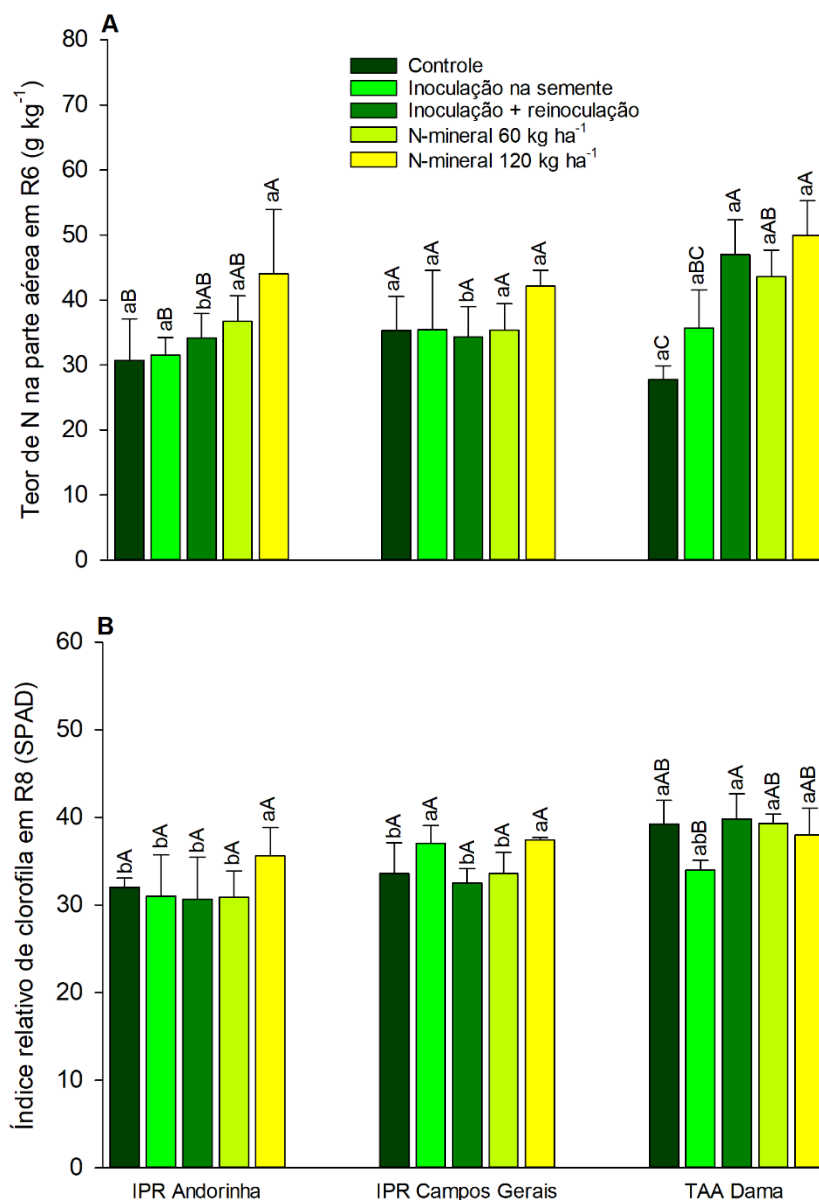
⁽¹⁾Médias seguidas da mesma letra, na coluna e dentro de cada fator e experimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Controle: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral 60 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

Tabela 17 – Teste de médias e resumo da análise de variância para o índice relativo de clorofila (IRC), matéria seca da parte aérea (MSPA), teor de N na parte aérea (TN), teor de N na folha diagnose (TNF) e quantidade de N total acumulado na parte aérea (NAPA) de cultivares de feijão-comum no estágio fenológico R8 submetidas a diferentes formas para fornecimento de N em dois experimentos de campo conduzidos em Botucatu

Tratamento	IRC	MSPA	TN	TNF	NAPA
SPAD					
Botucatu I					
Cultivar (C)					
IPR Andorinha	37,34 a ⁽¹⁾	3929,25 a	26,74 b	37,06 b	105,56 b
IPR Campos Gerais	33,34 b	3976,82 a	29,88 ab	44,40 a	117,43 ab
TAA Dama	38,50 a	4374,65 a	30,87 a	42,63 a	134,80 a
Fornecimento de N (FN)					
Controle	34,42 b	3077,38 b	26,32 a	39,24 b	80,66 d
Inoculação na semente	35,60 b	3356,56 b	29,08 a	41,43 ab	96,53 cd
Inoculação + reinoculação	35,08 b	4060,42 ab	29,98 a	40,62 ab	119,27 bc
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	37,33 ab	4780,25 a	29,23 a	41,28 ab	140,73 ab
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	39,53 a	5193,28 a	31,20 a	44,22 a	159,12 a
Fonte de Variação	$P > F$				
C	<0,001	0,319	0,035	<0,001	0,014
FN	0,001	<0,001	0,218	0,028	<0,001
C × FN	0,737	0,436	0,198	0,571	0,455
CV (%)	8,61	29,8	17,3	8,7	25,3
Botucatu II					
Cultivar (C)					
IPR Andorinha	32,03 c ⁽¹⁾	3465,07 a	33,67 a	37,69 a	118,70 a
IPR Campos Gerais	34,82 b	3890,41 a	31,48 a	39,31 a	119,58 a
TAA Dama	38,06 a	3676,03 a	30,70 a	37,27 a	116,11 a
Fornecimento de N (FN)					
Controle	34,95 a	2681,44 c	29,92 a	36,53 a	80,46 c
Inoculação na semente	33,99 a	3302,43 bc	32,41 a	38,70 a	106,57 bc
Inoculação + reinoculação	34,33 a	3098,24 bc	32,49 a	37,51 a	100,33 bc
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	34,58 a	4180,36 ab	30,55 a	37,42 a	126,81 b
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	37,00 a	5123,37 a	34,37 a	40,30 a	176,47 a
Fonte de Variação	$P > F$				
C	<0,001	0,441	0,139	0,157	0,958
FN	0,105	<0,001	0,167	0,095	<0,001
C × FN	0,021	0,276	0,104	0,670	0,107
CV (%)	8,3	28,3	15,02	9,0	33,1

⁽¹⁾Médias seguidas da mesma letra, na coluna e dentro de cada fator e experimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Controle: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral 60 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

Figura 13 – Desdobramento entre cultivares e as diferentes formas para fornecimento de N, para as variáveis teor de N na parte aérea (A) do feijão-comum no estágio fenológico R6 e índice relativo de clorofila (B) em R8 no experimento de campo conduzido em Botucatu II. Letras minúsculas comparam as cultivares dentro de cada forma de fornecimento de N, enquanto letras maiúsculas comparam as formas de fornecimento de N dentro de cada cultivar com valor de $p < 0,05$ de acordo com o teste de Tukey



Controle: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha^{-1} do inoculante líquido; N-mineral 60 kg ha^{-1} : fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha^{-1} de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral 120 kg ha^{-1} : fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha^{-1} de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

O crescimento vegetativo e absorção de N pelo feijoeiro-comum, representados pelo acúmulo de matéria seca na parte aérea (MSPA; Figura 14) e pela quantidade de N total acumulado na parte aérea (NAPA; Figura 15), apresentaram padrão

sigmoide (Magalhães, 1979), sendo o modelo que melhor representou as variáveis. Brito et al. (2009), estudando a marcha de absorção do N no feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) e no feijão-comum, também obtiveram curvas de crescimento do tipo sigmoide.

A MSPA, nos dois experimentos e em todos os tratamentos utilizados (formas para fornecimento de N e cultivares), foi incrementada, até 75 dias após a emergência (DAE) (Figura 14). Todas as curvas mostram um padrão sigmoide típico de acúmulo de MSPA, ou seja, um período inicial de crescimento lento (até 45 DAE), seguido por uma fase de crescimento rápido (de 45 a 65 DAE) e, finalmente, uma leve desaceleração no final do ciclo da cultura, quando o acúmulo de MSPA tende a se estabilizar ou até mesmo diminuir ligeiramente (devido à senescência).

A cv. TAA Dama tendeu a apresentar maiores valores de MSPA aos 75 DAE, em ambos os experimentos, seguida pela IPR Campos Gerais e, por último, a IPR Andorinha (Figura 14). Isto é condizendo com os tipos de materiais utilizados, pois as cultivares de feijão-comum de hábito de crescimento indeterminado (TAA Dama e IPR Campos Gerais) apresentam maior capacidade de desenvolvimento vegetativo, principalmente maior emissão de ramos e alongação do caule principal, do que as cultivares de feijão-comum de hábito de crescimento determinado (IPR Andorinha) (Fancelli e Dourado Neto, 2007).

No experimento de Botucatu I, as três cultivares estudadas foram favorecidas em diferentes graus pelas formas para fornecimento de N, sendo o T5 (fertilização com 120 kg ha⁻¹ de N mineral) com maior expressividade na MSPA, seguido pelo T4 (fertilização com 60 kg ha⁻¹ de N mineral), T3 (inoculação + reinoculação), T2 (inoculação via semente) e T1 (controle) (Figura 14A, 14C e 14E). Em suma, os menores valores de MSPA em todas as cultivares e experimentos para o tratamento T1 (controle), era esperado, visto que o feijão-comum tem alta demanda por N, e sua ausência pode limitar severamente o crescimento. A reinoculação em pós-emergência (T3) frequentemente resultou em um acúmulo de MSPA igual ou superior ao T2, sugerindo que uma dose adicional de *Rhizobium* pode otimizar a FBN.

Os resultados de MSPA para a IPR Andorinha, em Botucatu I, foram superiores no tratamento T5 aos 75 DAE (7520 kg ha⁻¹) em relação aos demais tratamentos (T4 – 5141 kg ha⁻¹; T3 – 5073 kg ha⁻¹; T2 – 4787 kg ha⁻¹; T1 – 4393 kg ha⁻¹) (Figura 14A). Para as cultivares IPR Campos Gerais e TAA Dama, houve diferença estatística entre os tratamentos aos 25, 35, 55 e 65 DAE, onde o tratamento T5 resultou nos maiores

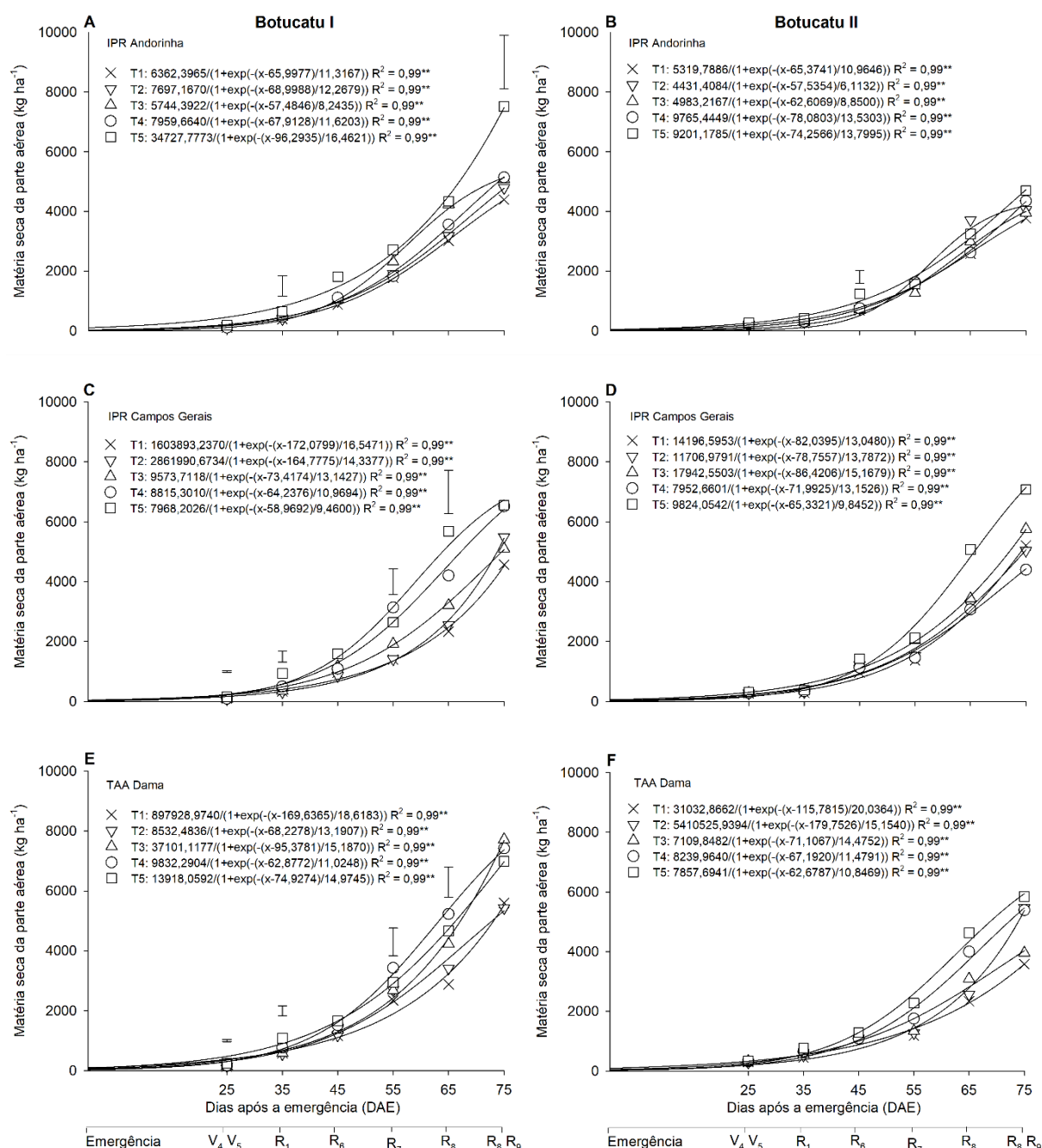
resultados, seguido pelo T4 e T3, em relação ao controle (Figuras 14C e 14E). Ambos os tratamentos com N-mineral (T4 e T5) consistentemente mostraram os maiores acúmulos de MSPA, superando a inoculação. Isso indica a alta responsividade do feijão-comum ao N-mineral.

Em Botucatu II, a quantidade de MSPA acumulado ao final das amostragens foi menor que no experimento de Botucatu I, com uma diferença de pelo menos 29, 13 e 37% em relação aos dois experimentos para as cultivares IPR Andorinha, IPR Campos Gerais e TAA Dama, respectivamente (Figuras 14B, 14D, 14F). No entanto, comportamento idêntico dos resultados descritos anteriormente foi observado, ou seja, independente da cultivar, os tratamentos T5 (2388 kg ha⁻¹), T4 (1876 kg ha⁻¹), T2 (1852 kg ha⁻¹), T3 (1838 kg ha⁻¹) e T1 (1631 kg ha⁻¹) apresentaram, nesta devida ordem, as maiores influências no acúmulo de MSPA do feijoeiro-comum. Além disso, não foi detectada diferença estatística entre as formas para fornecimento de N em função dos dias de amostragem.

O fato de os tratamentos terem apresentado diferença estatística em relação aos momentos de amostragem (25, 35, 45, 55, 65 e 76 DAE) no experimento de Botucatu I, enquanto em Botucatu II não houve, pode ser explicado pelas condições ambientais de ambos os experimentos, mais precisamente a temperatura (Figura 3), devido a influência que a temperatura exerce sobre o crescimento e desenvolvimento da cultura (Pereira *et al.*, 2014).

Barbano *et al.* (2001) relata efeitos negativos no crescimento do feijão-comum, onde a temperatura permanece acima de 30 °C durante o dia. Reichert *et al.* (2015), também relataram que, picos de temperaturas acima de 30 °C durante o dia, proporcionam efeitos negativos no crescimento e desenvolvimento do feijoeiro-comum. Deste modo, em Botucatu I, a temperatura máxima e mínima média foi de 29,17 °C e 17,06 °C, respectivamente, enquanto em Botucatu II está temperatura média foi de 25,14 °C de máxima e 16,43 °C de mínima (Figura 3). Ou seja, a amplitude térmica em Botucatu II estava muito mais propícia ao crescimento e desenvolvimento do feijão-comum, do que em Botucatu I, o que pode ter influenciado para não haver diferença entre os tratamentos testados.

Figura 14 – Acúmulo de matéria seca na parte aérea (MSPA) ao longo do ciclo das cultivares de feijão-comum IPR Andorinha (A e B), IPR Campos Gerais (C e D) e TAA Dama (E e F) cultivadas nos dois experimentos conduzidos em Botucatu e submetidas a diferentes formas para fornecimento de N. As barras verticais indicam os valores de DMS entre as formas de fornecimento de N pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$) em cada dia de amostragem (DAE). * e ** são: significativo a 5 e 1% de probabilidade de acordo com o teste F, respectivamente



T1: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; T2: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; T3: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; T4: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; T5: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

A quantidade de N total acumulado na parte aérea (NAPA) ao longo do ciclo das cultivares, foi mais favorecida no experimento de Botucatu I que em Botucatu II, no entanto, em ambos os experimentos, notou-se um comportamento semelhante dos dados (Figura 15). Ou seja, o total de N acumulado em todas as cultivares de feijão-comum foi pouco incrementado até 35 DAE, ao passo que a partir de 45 DAE, quando as cultivares estavam no estágio fenológico R6, houve um aumento exponencial do acúmulo de N até 75 DAE. A cultura do feijão-comum necessita de quantidades adequadas de N em todas as fases do seu ciclo de crescimento, pois, há um aumento significativo pela demanda de N durante períodos de rápido crescimento, sendo os períodos de maior demanda os estádios de pré-florescimento (R5) e florescimento pleno (R6), quando a taxa de absorção é elevada (Guidorizzi *et al.*, 2023; Perez *et al.*, 2013).

A cv. IPR Campos Gerais aos 75 DAE resultou nos maiores aportes de N acumulado em ambos os experimentos no tratamento T5 (167 kg ha^{-1}), seguida pela TAA Dama (157 kg ha^{-1}) e IPR Andorinha (155 kg ha^{-1}) (Figura 15). O tratamento T3 (inoculação + reinoculação) resultou no terceiro melhor resultado para NAPA, com valores próximos aos obtidos no tratamento T4 (60 kg ha^{-1} de N-mineral), onde o N total acumulado na parte aérea, independente do dia de amostragem foi de 57 kg ha^{-1} para os tratamentos T3 e T4 na cv. IPR Andorinha; 65 kg ha^{-1} (T3) e 70 kg ha^{-1} (T4) para IPR Campos Gerais; e de 70 kg ha^{-1} (T3) e 83 kg ha^{-1} (T4) para TAA Dama (Figura 15).

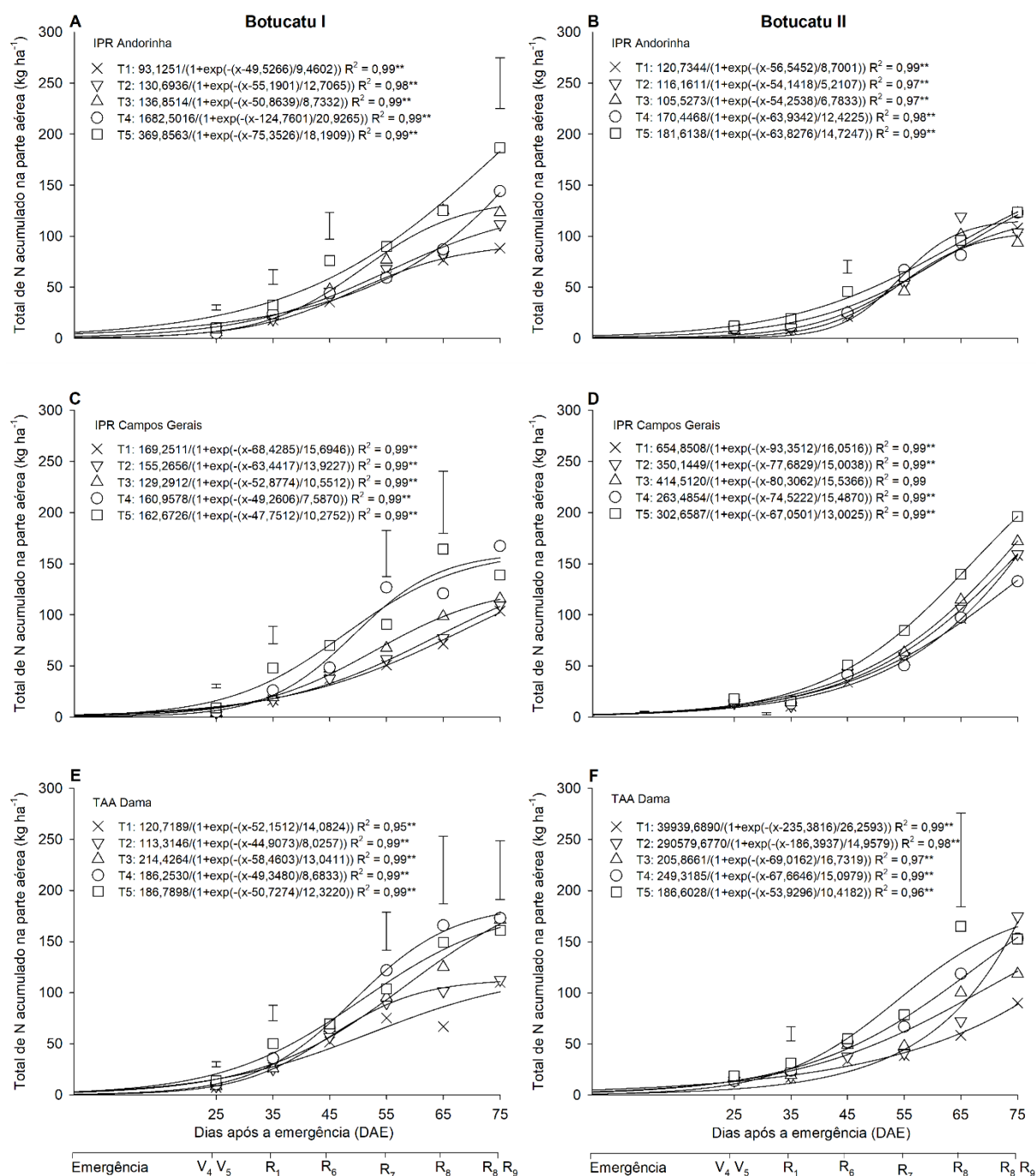
Houve diferença estatística entre os tratamentos em função dos dias de amostragem. Na cv. IPR Andorinha, em Botucatu I, maiores médias para NAPA foram observadas no tratamento T5 aos 25, 35, 45 e 75 DAE; enquanto em Botucatu II, somente aos 46 DAE houve essa diferença estatística (Figura 15A e 15B). Para as cultivares IPR Campos Gerais e TAA Dama em Botucatu I, o tratamento T5 resultou nas maiores médias aos 25, 35, 55, e 65 DAE para o NAPA (Figura 15C e 15E); com exceção aos 65 e 75 DAE em ambos os experimentos (II e I, respectivamente), que a TAA Dama apresentou valor do NAPA significativamente maior no tratamento T5 em relação aos demais tratamentos (Figura 15E e 15F).

Em geral, o T5 resultou nos maiores acúmulos de N na parte aérea, com um incremento, em relação ao controle, de 78, 57 e 52% para as cultivares TAA Dama, IPR Campos Gerais e IPR Andorinha, respectivamente (Figura 15). Este incremento, quando comparado o tratamento T4 com o controle, foi de 18, 29 e 69% para as

cultivares IPR Andorinha, IPR Campos Gerais e TAA Dama, respectivamente. Seguindo a mesma lógica, o tratamento T3 em relação ao controle, incrementou em 19, 19 e 43% a NAPA das cultivares IPR Andorinha, IPR Campos Gerais e TAA Dama. Na respectiva ordem, o tratamento T2 comparado ao controle, aumentou a NAPA das cultivares IPR Andorinha, IPR Campos Gerais e TAA Dama em 14, 7 e 27%. Em alguns casos, o tratamento T3 (inoculação na semente + reinoculação) mostrou um leve aumento no NAPA em comparação com T2 (apenas inoculação na semente), sugerindo que a reinoculação em pós-emergência pode otimizar a FBN, embora essa diferença nem sempre seja estatisticamente significativa e nem sempre atinge os níveis da fertilização mineral.

Nota-se que a depender da cultivar, o grau de aumento no acúmulo de N na parte aérea da planta em relação ao controle foi variado nos diferentes tratamentos. Isto possibilita inferir que a cv. TAA Dama foi muito mais responsiva a inoculação e reinoculação, que as demais cultivares estudadas, acarretando os maiores aumentos do NAPA em relação ao controle, resultados semelhantes ao relatado por Almeida et al. (2022), assim como a sua resposta a fertilização com N-mineral, que respondeu em maior grau que as demais cultivares, quando analisado o NAPA das cultivares nos tratamentos fertilizados com N-mineral em relação ao controle.

Figura 15 – N total acumulado na parte aérea (NAPA) ao longo do ciclo das cultivares de feijão-comum IPR Andorinha (A e B), IPR Campos Gerais (C e D) e TAA Dama (E e F) cultivadas nos dois experimentos conduzidos em Botucatu e submetidas a diferentes formas para fornecimento de N. As barras verticais indicam os valores de DMS entre as formas de fornecimento de N pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$) em cada dia de amostragem (DAE). * e ** são: significativo a 5 e 1% de probabilidade de acordo com o teste F, respectivamente



T1: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; T2: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; T3: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; T4: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; T5: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

Uma vez que o N é o principal nutriente responsável pelo aumento da biomassa seca das plantas (Embrapa, 2018; Quintela, 2001) e a fertilização com N-mineral aumenta a disponibilidade deste nutriente no solo (Ribeiro *et al.*, 2024). Consequentemente, a absorção do N pelo sistema radicular do feijoeiro-comum é aumentada, logo, era esperado estes resultados descritos anteriormente para MSPA (Figura 14) e NAPA (Figura 15) nos tratamentos com fertilização mineral de N. Soratto *et al.* (2017), Souza *et al.* (2011), Crusciol *et al.* (2007) e Soratto *et al.* (2006) relataram um aumento linear e significativo na biomassa de matéria seca do feijoeiro com aumento nas doses de N, corroborando com o descrito no presente estudo.

Vale ressaltar que o tratamento T1 (controle) foi o único tratamento que apresentou, em algum momento do ciclo da cultura, sintomas de clorose generalizada na folhagem do feijoeiro, levando à detecção de deficiência devido à menor e/ou ausente quantidade de N disponível. Ao passo que, nos demais tratamentos, com inoculação, reinoculação e fertilização com N-mineral, o sintoma de deficiência por N foi atenuado (APÊNDICE R). Resultados semelhantes foram relatados por Ribeiro *et al.* (2024), que estudaram o processo de nodulação, a morfofisiologia e a produtividade de plantas de feijoeiro em resposta à reinoculação com *R. tropici*, à co-inoculação de *A. brasilense* e à aplicação dos micronutrientes Co/Mo em cobertura no estágio V4.

Ao longo do ciclo do feijão-comum, após sua emergência (DAE), houve uma tendência de redução no teor de N na parte aérea (TN) em função dos DAE (Tabela 18). Quando comparado o TN aos 25 DAE com o TN aos 75 DAE, houve uma variação de até 64% na referida variável no experimento de Botucatu I e de 51% em Botucatu II. Possivelmente, esta redução no teor de N das plantas está relacionado com o efeito da diluição deste nutriente, decorrente do maior crescimento e desenvolvimento da parte aérea das plantas ao passo que se avançava o ciclo. Ou seja, conforme se intensificava o acúmulo de MSPA das plantas, o teor de N sofria uma diluição do seu teor, o que pode ser explicado pela curva de diluição crítica de N na cultura (Soratto *et al.*, 2025). No entanto, o fato de o teor de N na biomassa vegetal sofrer este efeito de diluição, isto não afeta negativamente o acúmulo de N, como já demonstrado anteriormente na Figura 15 e, também, evidenciado por outros trabalhos da literatura (Gaspar *et al.*, 2017; Maia *et al.*, 2012).

As cultivares TAA Dama e IPR Campos Gerais apresentaram as maiores valores de TN na parte aérea das plantas, independente das formas para fornecimento de N

e dos dias de amostragem, diferindo-as da cv. IPR Andorinha (Tabela 18), o que pode ter ocorrido, entre outros fatores, pela diferença na exigência nutricional de cada cultivar. Resultados semelhantes foram relatados por Aires et al. (2019), os quais relataram uma maior concentração de N na cv. IPR Campos Gerais comparado as cultivares BRS Notável e IAC Imperador.

O TN, de maneira geral, foi sempre maior no tratamento com 120 kg ha⁻¹ de N-mineral que nas demais formas para fornecimento de N, o que explica os melhores resultados, para este tratamento, obtidos anteriormente (Figuras 14 e 15). O N é nutriente chave para aumentar o índice de área foliar e, conseqüentemente, as taxas de fotossíntese, promovendo assim maior acúmulo de matéria seca pelas plantas e acúmulo de N total na parte aérea das plantas (Shiade *et al.*, 2024; Fageria e Baligar, 2005; Gastal e Lemaire, 2002). Quando houve diferença estatística entre as diferentes formas para fornecimento de N nos dois experimentos de campo conduzidos em Botucatu, em função dos dias de amostragem (DAE), o mesmo ocorreu, com os maiores resultados na maior dose de N-mineral (120 kg ha⁻¹). Exceção para 75 DAE da IPR Andorinha em Botucatu I, onde a inoculação + reinoculação resultou na maior média para o TN.

De todo modo, comparando-se os dados de TN com os níveis de N considerados adequados para o feijoeiro-comum na literatura (Kikuti *et al.*, 2006; Malavolta *et al.* 1997), se verifica que os teores de N estavam na faixa adequada, mesmo no tratamento controle (Tabela 18). Devido à alta relação C/N da palhada remanescente, pode ter ocorrido mineralização gradual da palhada e, conseqüentemente, disponibilidade de N durante todo o ciclo para a cultura do feijão-comum no tratamento sem adubação com N-mineral e/ou inoculação com rizóbio (controle), conforme elucidado por Cantarella (2007) e descrito por Soratto et al. (2022).

Tabela 18 – Teste de médias para o teor de N na parte aérea ao longo do ciclo das cultivares de feijão-comum submetidas a diferentes formas para fornecimento de N em dois experimentos de campo conduzidos em Botucatu. Os dias de amostragem são representados pelos dias após a emergência (DAE)

Tratamento	25 DAE	35 DAE	45 DAE	55 DAE	65 DAE	75 DAE
Botucatu I						
IPR Andorinha						
Controle	40,95 c	46,70 b	40,28 a	33,87 a	25,18 a	20,42 b
Inoculação na semente	52,09 ab	46,62 b	44,53 a	35,80 a	26,86 a	23,91 ab
Inoculação + reinoculação	43,27 bc	49,15 b	44,55 a	34,07 a	26,86 a	27,40 a
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	53,92 a	51,16 ab	41,40 a	31,87 a	28,23 a	24,91 ab
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	59,02 a	55,82 a	44,97 a	31,05 a	26,57 a	25,23 ab
IPR Campos Gerais						
Controle	46,36 c	49,07 b	39,37 a	36,68 a	30,70 a	23,15 a
Inoculação na semente	46,03 c	52,56 ab	43,23 a	39,18 a	30,29 a	20,02 a
Inoculação + reinoculação	45,49 c	53,38 ab	43,32 a	38,32 a	30,94 a	26,10 a
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	53,98 b	51,96 ab	42,92 a	34,38 a	27,41 a	21,70 a
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	63,78 a	58,07 a	40,38 a	36,10 a	30,07 a	23,54 a
TAA Dama						
Controle	53,84 a	45,85 a	44,85 a	32,64 a	23,09 a	19,45 b
Inoculação na semente	57,86 a	45,04 a	47,92 a	35,06 a	30,09 a	21,09 ab
Inoculação + reinoculação	57,94 a	44,01 a	44,50 a	34,11 a	32,15 a	23,00 ab
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	57,26 a	47,51 a	42,96 a	35,92 a	32,06 a	23,43 a
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	59,19 a	52,64 a	50,87 a	29,67 a	36,96 a	24,21 a
Botucatu II						
IPR Andorinha						
Controle	47,10 a	35,42 a	30,70 a	36,74 a	33,26 ab	29,17 a
Inoculação na semente	47,77 a	33,76 a	31,50 a	37,74 a	32,89 ab	23,89 a
Inoculação + reinoculação	44,03 a	38,30 a	34,11 a	37,00 a	32,82 ab	27,95 a
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	48,43 a	42,81 a	36,70 a	39,58 a	29,40 b	25,78 a
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	49,63 a	43,54 a	44,03 a	40,63 a	40,00 a	27,49 a
IPR Campos Gerais						
Controle	53,21 a	36,70 b	35,28 a	37,38 a	31,93 a	32,45 a
Inoculação na semente	50,32 a	33,91 b	35,43 a	36,41 a	32,61 a	31,19 a
Inoculação + reinoculação	51,04 a	36,70 b	34,30 a	31,98 a	32,82 a	27,96 a
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	56,09 a	41,20 ab	35,34 a	39,14 a	28,74 a	28,71 a
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	55,08 a	49,51 a	42,14 a	41,91 a	31,28 a	27,24 a
TAA Dama						
Controle	47,74 a	37,65 a	27,72 c	32,45 b	24,55 a	25,05 a
Inoculação na semente	47,91 a	34,11 a	35,67 bc	33,99 b	31,75 a	29,67 a
Inoculação + reinoculação	47,48 a	36,19 a	46,98 a	35,57 ab	31,84 a	31,04 a
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	53,28 a	40,72 a	43,56 ab	36,60 ab	33,53 a	26,09 a
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	55,83 a	41,61 a	49,96 a	45,04 a	31,82 a	26,01 a

Médias seguidas da mesma letra na coluna, para cada cultivar nos dois experimentos de campo, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Controle: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral 60 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

A população final de plantas (PFP) não foi influenciada pelas cultivares, tampouco pelas formas para fornecimento de N, em ambos os experimentos (Tabela 19). Na semeadura e nos dias seguintes até o estabelecimento da cultura, as condições climáticas foram favoráveis para o bom desenvolvimento do feijoeiro (Figura 3). Isto justifica o bom estabelecimento da cultura em todas as parcelas experimentais, com média de 12 plantas por metro linear em todas as parcelas experimentais. Os demais componentes da produção (número de vagens por planta – NVP, número de grãos por vagem – NGV e massa de 100 grãos – M100G), assim como a produtividade de grãos (PROD), foram influenciados pelos fatores estudados, nos dois experimentos. As cultivares IPR Campos Gerais e TAA Dama resultaram nos maiores valores de NGV e PROD, em relação a IPR Andorinha, nos dois experimentos conduzidos.

Houve incremento, na respectiva ordem, para as cultivares IPR Campos Gerais e TAA Dama em relação a IPR Andorinha, de 22 e 21% para NGV, 15 e 15% para PROD em Botucatu I; 15 e 6% para NGV, 13 e 11% para PROD em Botucatu II (Tabela 19). Somente a M100G foi superior na cv. IPR Andorinha e TAA Dama, diferindo estatisticamente da IPR Campos Gerais (Tabela 19). O fator genético, intrínseco a cada cultivar, pode ter influenciado essas variações nas variáveis de componentes agronômicos (Guimarães *et al.*, 2017; Salgado *et al.*, 2011; Alves *et al.*, 2009). No entanto, com base nas fichas técnicas de cada cultivar, o NVP, NGV e M100G estão dentro do que é considerado ideal para cada uma das cultivares estudadas (Gonçalves, 2022; Iapar, 2013; Iapar, 2011).

A adubação com N-mineral, especialmente na dose de 120 kg ha^{-1} , proporcionou os maiores resultados para o NVP (16,54 vagens), M100G (28,80 g) e PROD (3897,29 kg ha^{-1}) em Botucatu I; NVP (17,92 vagens) e PROD (5373,38 kg ha^{-1}) em Botucatu II (Tabela 19). Houve aumentos, em relação ao controle, de 35% no NGV, 7% na M100G e 30% na PROD em Botucatu I, enquanto em Botucatu II, estes acréscimos foram de 65% para NGV e a mesma porcentagem para PROD, em relação ao controle. Seguindo está mesma linha de resultado, o tratamento com 60 kg ha^{-1} de N-mineral em Botucatu I, que resultou no segundo melhor tratamento, aumentou, em relação ao controle, 16% o NGV, 3% a M100G e 16% a PROD, ao passo que em Botucatu II, o NGV e a PROD obtiveram incrementos de 45 e 38%, respectivamente, no referido tratamento quando comparado ao controle (Tabela 19).

Consta-se na literatura a responsividade da cultura do feijoeiro à adubação nitrogenada, de modo a proporcionar acréscimos da produtividade dos grãos em função das doses de N-mineral aplicadas (Souza *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2017; Soratto *et al.*, 2011; Teixeira *et al.*, 2008), o que tem sido um fator substancial na produção agrícola e corrobora com os resultados do presente estudo. Porém, mesmo os tratamentos inoculados (inoculação na semente e inoculação + reinoculação) não tendo resultado valores próximos e/ou equivalente aos tratamentos com fertilização mineral de N, foi possível notar, também, maiores produtividades de grãos nestes tratamentos em relação ao controle, apesar de não diferirem estatisticamente. Quando utilizado a inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente ou a inoculação + reinoculação em pós-emergência, acréscimos de 5 e 7% na PROD foram observados em Botucatu I nestes respectivos tratamentos, comparados ao controle. Em Botucatu II, tais incrementos na PROD foram ainda maiores, onde a inoculação exclusivamente na semente e a inoculação + reinoculação, proporcionaram aumentos de 17 e 15% em relação ao controle (Tabela 19).

Ademais, foi possível averiguar que os incrementos da produtividade do feijoeiro-comum, nos tratamentos inoculados, é, em termos práticos, foi de até 3 e 9 sacas produzidas por hectare em Botucatu I e II, respectivamente (Tabela 19). Enquanto para os tratamentos fertilizados com N-mineral (60 e 120 kg ha⁻¹), os incrementos em sacas por hectare foram de até 15 e 35 sacas em Botucatu I e II, respectivamente. Sousa et al. (2022a), ao estudar a eficiência da inoculação com *Rhizobium* no feijão-comum, revelou que a prática de inoculação rizobiana, em relação à não utilização destes inoculantes, aumenta consistentemente a produtividade de grãos, mas não na mesma proporção que a fertilização com N-mineral, assim como evidenciado no presente estudo.

Tabela 19 – Teste de médias e resumo da análise de variância para a população final de plantas (PFP), número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), massa de 100 grãos (M100G) e produtividade de grãos (PROD) de cultivares de feijão-comum no estágio fenológico R9 submetidas a diferentes formas para fornecimento de N em dois experimentos de campo conduzidos em Botucatu

Tratamento	PFP	NVP	NGV	M100G	PROD
	planta ha ⁻¹	nº planta ⁻¹	nº vagem ⁻¹	g	kg ha ⁻¹
Botucatu I					
Cultivar (C)					
IPR Andorinha	215388,89 a ⁽¹⁾	14,16 a	3,88 b	28,04 a	3018,24 b
IPR Campos Gerais	214814,81 a	14,31 a	4,98 a	26,19 b	3554,94 a
TAA Dama	211629,63 a	13,78 a	4,71 a	27,92 a	3466,00 a
Fornecimento de N (FN)					
Controle	208950,62 a	12,28 b	4,57 a	26,98 ab	3002,28 b
Inoculação na semente	213580,25 a	13,50 b	4,52 a	26,72 ab	3144,00 b
Inoculação + reinoculação	224722,22 a	13,80 b	4,54 a	26,50 b	3200,86 b
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	216604,94 a	14,30 ab	4,46 a	27,92 ab	3487,54 ab
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	205864,20 a	16,54 a	4,53 a	28,80 a	3897,29 a
Fonte de Variação	<i>P > F</i>				
C	0,837	0,676	<0,001	0,006	0,001
FN	0,252	<0,001	0,962	0,033	<0,001
C × FN	0,660	0,211	0,997	0,614	0,757
CV (%)	10,0	13,9	7,7	7,1	13,7
Botucatu II					
Cultivar (C)					
IPR Andorinha	199888,89 a ⁽¹⁾	14,88 a	4,88 b	28,24 a	3804,70 b
IPR Campos Gerais	209000,00 a	15,83 a	5,72 a	27,23 b	4354,38 a
TAA Dama	211277,78 a	14,25 a	5,16 b	28,74 a	4208,10 ab
Fornecimento de N (FN)					
Controle	204537,04 a	10,86 c	5,23 a	27,84 a	3247,62 c
Inoculação na semente	206388,89 a	15,25 b	5,17 a	27,47 a	3785,87 bc
Inoculação + reinoculação	205092,59 a	15,15 b	5,25 a	27,52 b	3729,10 bc
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	206481,48 a	15,75 ab	5,34 a	28,53 a	4476,00 b
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	211111,11 a	17,92 a	5,28 a	28,99 a	5373,38 a
Fonte de Variação	<i>P > F</i>				
C	0,188	0,083	<0,001	0,023	0,041
FN	0,940	<0,001	0,971	0,138	<0,001
C × FN	0,962	0,140	0,986	0,591	0,409
CV (%)	9,88	14,6	15,9	6,0	16,6

⁽¹⁾Médias seguidas da mesma letra, na coluna e dentro de cada fator e experimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Controle: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral 60 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

O teor de N nos grãos (TNG), o teor de proteína bruta nos grãos (TPG) e a produtividade de proteína bruta (PPB), foram sempre superiores na cv. TAA Dama, em comparação com a IPR Andorinha, em Botucatu I (Tabela 20). O mesmo se repetiu em Botucatu II, no entanto, com diferença significativa obtida apenas na variável PPB. Provavelmente, isto ocorreu em detrimento dos maiores resultados obtidos, para a referida cultivar, nas variáveis já discutidas anteriormente, onde a TAA Dama expressou o maior potencial no acúmulo de matéria seca e teor de N na parte aérea, além da maior produtividade de grãos obtida nessa cultivar.

Quando a fertilização com N-mineral na dose de 120 kg ha⁻¹ foi utilizada, os maiores TNG, TPG e PPB foram obtidos em ambos os experimentos conduzidos; seguido pelo segundo maior valor, nas mesmas variáveis, no tratamento com 60 kg ha⁻¹ de N-mineral (Tabela 20). Por participar da composição dos aminoácidos, o N tem relação direta com o teor de proteínas dos grãos (Malavolta *et al.*, 1997). Assim, uma maior concentração de N na parte aérea do feijoeiro-comum, principalmente nos tratamentos fertilizados com N (Tabela 18), pode explicar estes maiores resultados na concentração de proteína nos grãos das plantas de feijão-comum nos referidos tratamentos. Segundo Soratto *et al.* (2013), a maior parte do N absorvido pelo feijoeiro, entre 58-69%, é remobilizado para os grãos no início da fase reprodutiva, sendo especialmente um componente de proteínas.

Vale ressaltar que, os tratamentos inoculados e/ou reinoculados com *Rhizobium*, sobressaíram-se em relação ao tratamento controle, em termos de TNG, TPG e PPB no experimento Botucatu I, mas sem diferirem estatisticamente (Tabela 20). Por outro lado, em Botucatu II, o tratamento com inoculação + reinoculação proporcionou valores de TNG e TPG estatisticamente superiores ao controle. Apesar de não diferirem estatisticamente, o tratamento com inoculação + reinoculação proporcionou valores de PPB entre 13,2% (Botucatu I) e 22,6% (Botucatu II) superiores ao controle. Os valores de TPB e PPB encontradas no presente estudo, independentemente dos fatores estudados, estão equivalentes ou até superiores aos relatados por Kotz-Gurgacz *et al.* (2018) e Soratto *et al.* (2011).

Tabela 20 – Teste de médias e resumo da análise de variância para o teor de N nos grãos (TNG), teor de proteína bruta nos grãos (TPG) e a produtividade de proteína bruta (PPB) de cultivares de feijão-comum submetidas a diferentes formas para fornecimento de N em dois experimentos de campo conduzidos em Botucatu

Tratamento	TNG	TPG	PPB
	g kg ⁻¹		kg ha ⁻¹
	Botucatu I		
Cultivar (C)			
IPR Andorinha	42,34 b ⁽¹⁾	264,67 b	697,08 b
IPR Campos Gerais	43,10 b	269,37 b	835,84 a
TAA Dama	47,46 a	296,66 a	899,00 a
Fornecimento de N (FN)			
Controle	41,74 b	260,90 b	682,22 c
Inoculação na semente	44,16 ab	276,01 ab	759,65 bc
Inoculação + reinoculação	44,45 ab	277,81 ab	772,04 bc
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	44,59 a	278,71 a	846,72 ab
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	46,57 a	291,07 a	992,56 a
Fonte de Variação	<i>P > F</i>		
C	<0,001	<0,001	<0,001
FN	<0,001	<0,001	<0,001
C × FN	0,269	0,268	0,770
CV (%)	5,3	5,3	16,0
	Botucatu II		
Cultivar (C)			
IPR Andorinha	40,87 a ⁽¹⁾	255,49 a	848,58 b
IPR Campos Gerais	41,27 a	257,97 a	987,13 a
TAA Dama	42,20 a	263,80 a	970,71 ab
Fornecimento de N (FN)			
Controle	39,65 c	247,80 c	704,45 c
Inoculação na semente	40,66 bc	254,15 bc	837,11 bc
Inoculação + reinoculação	42,46 ab	265,38 ab	863,88 bc
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	40,60 bc	253,74 bc	987,16 b
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	43,90 a	274,38 a	1284,76 a
Fonte de Variação	<i>P > F</i>		
C	0,178	0,178	0,021
FN	<0,001	<0,001	<0,001
C × FN	0,482	0,481	0,400
CV (%)	5,5	5,5	17,6

⁽¹⁾Médias seguidas da mesma letra, na coluna e dentro de cada fator e experimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Controle: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral 60 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

A análise de componentes principais (PCA) dos experimentos de Botucatu, explicaram uma proporção significativa da variância total dos dados de 80,4% (Figura 16). Estes resultados corroboram e complementam as análises univariadas apresentadas nas Tabelas 14 a 20 e Figuras 12 a 15, oferecendo uma representação

clara das inter-relações entre as variáveis e o comportamento dos tratamentos. O primeiro componente principal (CP1), que explicou a maior parte da variância (54,0%), atuou como um gradiente que diferencia os tratamentos com base na estratégia de fornecimento de N. A forte correlação positiva do CP1 com as variáveis, como: MSPA, TN, TNF, NAPA, NVP, NGV, M100G, PROD, TNG, TPG e PPB; demonstra que a fertilização nitrogenada mineral (T4 e T5) foi a principal impulsionadora do aumento dessas características.

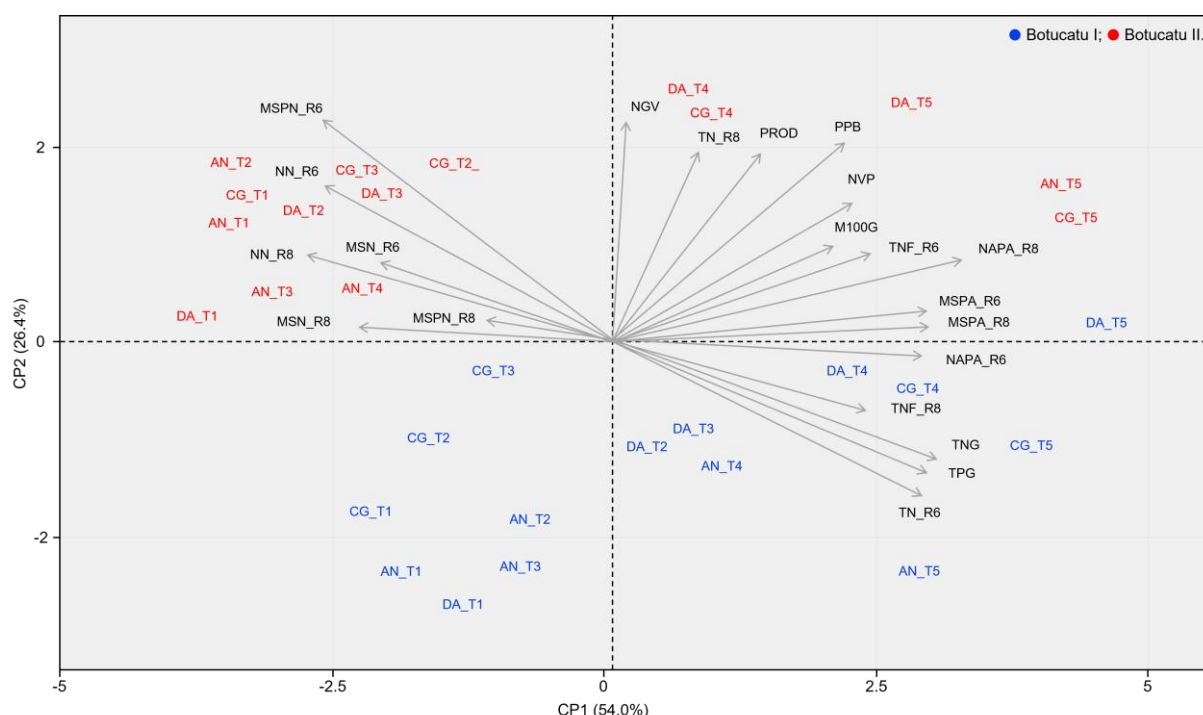
Este achado é consistente com a literatura, que amplamente reconhece o N como o nutriente mais limitante para a produtividade das culturas e sua aplicação resulta em incrementos significativos no crescimento e na produção de biomassa (Soratto *et al.*, 2011). Nas Tabelas 16, 17, 19 e 20, e Figuras 14 e 15, já havia evidenciado que os tratamentos com N-mineral, especialmente T5 (120 kg ha⁻¹ de N), proporcionaram os maiores valores para MSPA, NAPA e PROD, confirmando a alta responsividade do feijoeiro-comum a este nutriente (Souza *et al.*, 2011). Por outro lado, a correlação negativa do CP1 com as variáveis de nodulação (NN, MSN, MSPN – Figura 16) reflete o conhecido efeito inibitório de altas doses de N-mineral na formação e atividade dos nódulos (Pacheco *et al.*, 2020; Glodowska e Wozniak, 2019). A PCA evidenciou que os tratamentos com inoculação e o controle (T1, T2, T3), que se agruparam no lado negativo do CP1, foram os que mais favoreceram a nodulação, conforme detalhado nas Tabelas 14 e 15.

O segundo componente principal (CP2), embora com menor poder explicativo (26,4%), revelou nuances importantes, especialmente na diferenciação entre os dois experimentos e na relação com variáveis de nodulação e qualidade de grãos (Figura 16). A separação dos pontos de Botucatu I (azul) e Botucatu II (vermelho) ao longo do CP2 pode ser atribuída às diferenças nas condições ambientais, como a temperatura, que foram destacadas na Figura 3, como fatores que influenciaram o crescimento e desenvolvimento da cultura. Condições climáticas mais favoráveis em Botucatu II, por exemplo, podem ter modificado a expressão de algumas características, mesmo que a tendência geral de resposta aos tratamentos de N-mineral tenha sido mantida. Embora a nodulação tenha sido inibida pelo N-mineral, a PCA mostra que, nos tratamentos inoculados, a nodulação ainda desempenhou um papel importante, especialmente em Botucatu I. Isso demonstra que, mesmo com a barreira de competição de rizóbios nativos, os tratamentos inoculados mantiveram uma eficiência competitiva na nodulação.

A influência genotípica das cultivares também foi visualizada na PCA (Figura 16). As cultivares IPR Campos Gerais (CG) e TAA Dama (DA) consistentemente se agruparam com as variáveis de maior desempenho agrônômico (lado positivo do CP1), o que está em total consonância com os resultados apresentados anteriormente que as descrevem como mais responsivas e eficientes no uso de N-mineral e com maior potencial de nodulação e produtividade (Nunes *et al.*, 2021; Hiolanda *et al.*, 2018). Os resultados das Tabelas 14, 16, 17, 19 e 20, já haviam demonstrado a superioridade dessas cultivares em diversas características. A capacidade de diferentes genótipos de feijoeiro-comum em responder de maneira distinta à inoculação e à fertilização nitrogenada é um aspecto bem documentado na literatura, influenciado por fatores como o hábito de crescimento e a compatibilidade com as estirpes de *Rhizobium* (Rodiño *et al.*, 2011; Andraus *et al.*, 2016). A cultivar IPR Andorinha (AN), por sua vez, mostrou-se menos responsiva em algumas variáveis, o que também foi observado na PCA, com seus pontos mais dispersos ou associados a menores valores de produtividade.

Em resumo, as análises de PCA confirmam os padrões gerais observados nos experimentos de campo, destacando a importância da fertilização nitrogenada para a produtividade do feijão-comum quando se visa a obtenção de elevados patamares de produtividade, atingindo valor superior a 5,0 ton. ha⁻¹ com emprego de 120 kg ha⁻¹ de N mineral, mas também evidenciando o potencial da inoculação e, em particular, da reinoculação em pós-emergência, como uma alternativa promissora para otimizar a FBN e a absorção de N, especialmente em condições de campo, atingindo produtividades superiores a 3,0 ton. ha⁻¹. A variabilidade na resposta entre cultivares e locais de experimento sublinha a necessidade de abordagens de manejo específicas para cada situação, visando maximizar os benefícios da FBN e promover uma agricultura mais sustentável.

Figura 16 – Análise de componentes principais (PCA) dos experimentos conduzidos em Botucatu com três cultivares (IPR Andorinha, IPR Campos Gerais e TAA Dama) e diferentes formas para fornecimento de N



AN: IPR Andorinha; CG: IPR Campos Gerais; DA: TAA Dama. T1: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; T2: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; T3: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; T4: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; T5: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

No geral, embora a FBN seja crucial, a suplementação com N-mineral pode otimizar o crescimento e a acumulação de biomassa, especialmente em cultivares que não maximizam a FBN (Farhan *et al.*, 2024; Hirel e Lemaire, 2006). No entanto, os tratamentos inoculados (inoculação na semente e inoculação + reinoculação), na maioria das variáveis avaliadas no presente estudo, não superaram estatisticamente o tratamento controle, indicando que a FBN, por si só, pode não ter sido suficiente para atingir os mesmos níveis de produtividade que a adubação nitrogenada em altas doses, um desafio comum na cultura do feijão-comum (Oliveira *et al.*, 2021; Jesus *et al.*, 2018). Embora a adubação nitrogenada tenha proporcionado maiores valores de biomassa e acúmulo de N, a cv. TAA Dama, quando inoculada e reinoculada com *Rhizobium*, alcançou um estado nutricional de N comparável ao da adubação mineral. Este achado é crucial, pois indica o potencial da FBN em reduzir a dependência de fertilizantes nitrogenados em detrimento da cultivar, contribuindo para sistemas agrícolas mais sustentáveis e economicamente viáveis (Nogueira e Hungria, 2006).

É coerente afirmar que a prática de inoculação rizobial, seja ela com o inóculo exclusivamente na semente e/ou a inoculação + reinoculação, proporciona um aumento nas características agrônômicas do feijoeiro-comum, o que vai de acordo com outros resultados descritos na literatura (Aserse *et al.*, 2020; Oliveira *et al.*, 2017). No entanto, sustentar a tese de que tal prática (inoculação e/ou reinoculação) é o suficiente para suprir a demanda de N da cultura e, conseqüentemente, garantir altas produtividades equiparadas as fertilizações com N-mineral, ainda é muito irresoluto, devido às variações de seu impacto na produtividade de grãos do feijão-comum (Sousa *et al.*, 2022a; Hungria *et al.*, 2013).

Em suma, a escolha de cultivares de feijão-comum com alta capacidade de FBN, como a TAA Dama, combinada com práticas de inoculação e reinoculação, representa uma alternativa promissora para o manejo nutricional da cultura. Para que isto seja fortalecido, futuras pesquisas devem focar na identificação de estirpes de *Rhizobium* ainda mais eficientes e na compreensão dos mecanismos genéticos que conferem maior responsividade à FBN em diferentes cultivares, visando maximizar a produtividade do feijão-comum de forma sustentável.

4.4 Análise econômica dos experimentos de campo conduzidos com três cultivares em Botucatu

As informações econômicas quanto à variação do preço médio anual da ureia em toneladas, do inoculante (dose comercial) e da saca de feijão (60 kg), estão demonstrados na Figura 17. Ao longo da série história, o preço médio da ureia foi maior em 2022 (R\$ 5.237,80), seguido dos anos 2021 (R\$ 3.518,50), 2023 (R\$ 3.052,40) e 2024 (R\$ 2.807,10) (Figura 17A). O preço médio da dose comercial de inoculante foi aumentando gradativamente a partir de 2021 (R\$ 5,99) até o ano de 2024 (R\$ 8,90) (Figura 17B). A saca de feijão-comum tipo carioca, ao longo dos anos amostrados, foi a que mais apresentou variação nos seus valores. Em 2021, a saca de feijão custava R\$ 265,50, em 2022 aumentou para R\$ 311,35 e seguiu em queda nos anos seguintes, até atingir o valor de R\$ 269,43 em 2024. Os menores preços médios foram obtidos em 2014 para a tonelada da ureia (R\$ 1.330,60), o inoculante (R\$ 2,96) e a saca de feijão (R\$ 92,26). De maneira geral, quando comparado o maior preço médio obtido nos anos para a ureia, o inoculante e a saca de feijão, foi

observado um aumento de 294% para a ureia, 200% para o inoculante e de 237% na saca de feijão.

Quanto ao custo de cada tratamento (CT), ao longo dos anos amostrados, o custo seguiu a mesma linha de tendência para cada tratamento em todas as cultivares (Figura 18), ou seja, de 2014 até 2020 pouca variação no custo dos tratamentos foi observada. Já em 2021 houve um aumento significativo no custo dos tratamentos fertilizados com N-mineral, os quais seguiram acréscimo em 2022, com considerável redução no custo nos anos seguintes. Este resultado está atrelado ao preço médio da ureia, que aumentou, consideravelmente, nos anos de 2021 e 2022, (Figura 17A). Devido à escala gráfica, não é possível visualizar, assim como nos tratamentos fertilizados com N-mineral, a tendência de aumento nos custos para os tratamentos inoculados. No entanto, considerando que a partir de 2021 houve também um aumento no custo do inoculante (Figura 17B), então, é possível inferir que o custo dos tratamentos inoculados com rizóbio a partir deste ano também sofreu acréscimo. Destaca-se que, no período amostrado (2014-2024), os custos dos tratamentos fertilizados com N-mineral sempre foram maiores que os custos dos tratamentos inoculados com rizóbio (Figura 18).

A elevação dos custos médios dos insumos agrícolas, principalmente da ureia, pode estar relacionado com os efeitos da pandemia da Covid-19. Segundo o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada – CEPEA, em alguns países as atividades portuárias foram interrompidas, devido ao “lockdown”, havendo um desequilíbrio entre oferta e demanda mundial de fertilizantes (Osaki, 2020). Além da ordem sanitária, mais recentemente, outro acontecimento contribuiu, também, para o aumento dos preços dos fertilizantes no Brasil, a exemplo da guerra no leste europeu entre as nações russa e ucraniana, e que gerou várias conjunturas para o resto do mundo, sendo um dos primeiros efeitos a disparada nos preços globais de fertilizantes, intensificando a tendência de elevação dos preços verificado na Figura 17 (Nogueira *et al.*, 2025). Soma-se a isto o fato do Brasil ser um grande importador de fertilizantes, principalmente os de compostos nitrogenados, o que traz desafios para a economia brasileira e reflete nesta variação dos preços de produtos e insumos.

Figura 17 – Variação do preço médio anual da ureia em toneladas (A), dose do inoculante (B) e da saca de feijão (C) em uma série histórica de 2014-2024

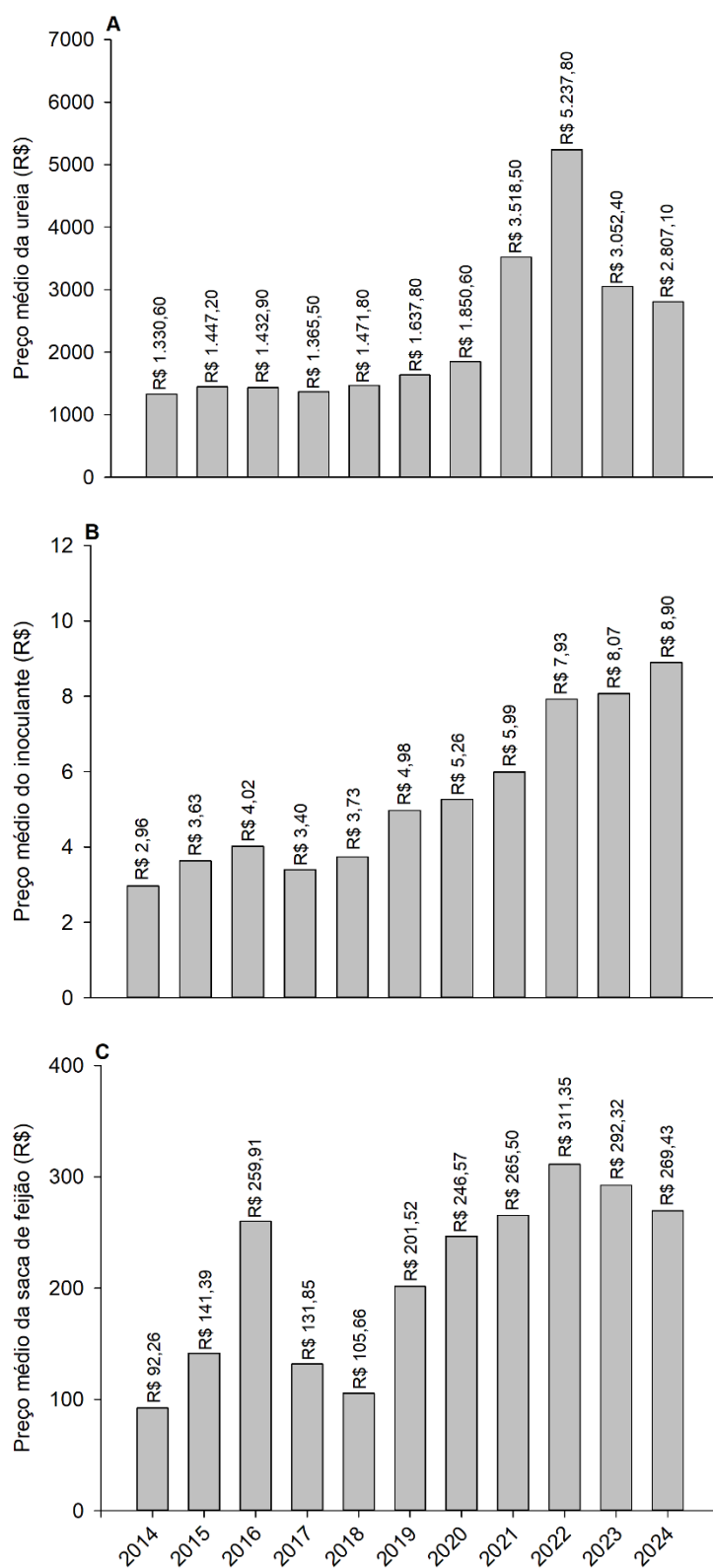
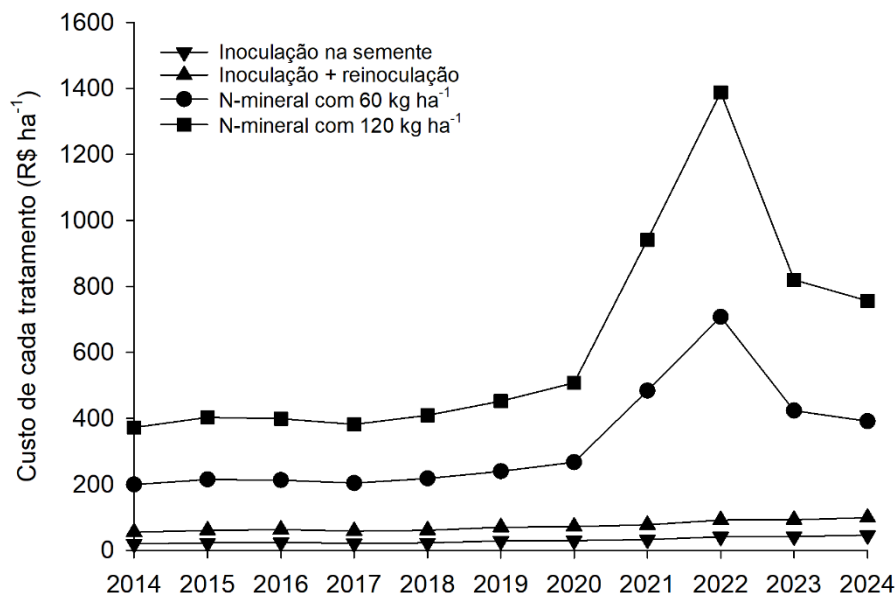


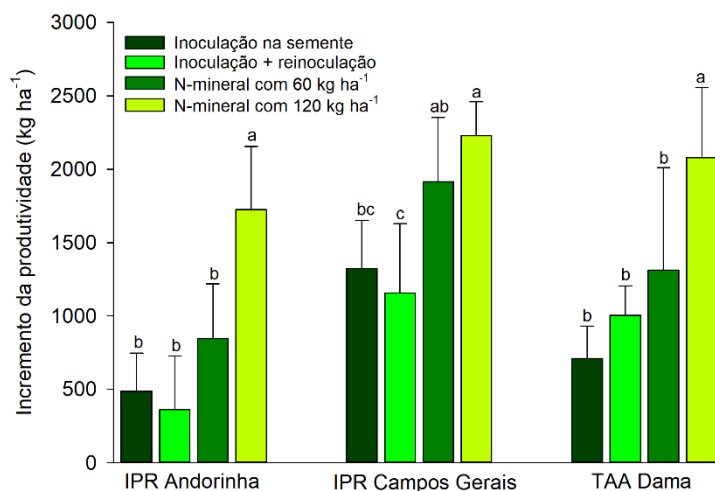
Figura 18 – Custo de cada tratamento (CT), em função dos anos (2014-2024), de dois experimentos conduzidos em Botucatu com três cultivares (IPR Andorinha, IPR Campos Gerais e TAA Dama) e quatro formas para fornecimento de N



Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral com 60 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral com 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

O maior incremento da produtividade (IP) ocorreu com a aplicação de 120 kg ha⁻¹ de N-mineral nas três cultivares estudadas, resultando 1724,06 kg ha⁻¹ na cultivar IPR Andorinha, 2228,32 kg ha⁻¹ na IPR Campos Gerais e 2078,77 kg ha⁻¹ na TAA Dama (Figura 19). Não houve diferença estatística para o IP, entre a aplicação de 60 kg ha⁻¹ de N-mineral e os tratamentos inoculados com rizóbio nas cultivares IPR Andorinha e TAA Dama. Para a cultivar IPR Campos Gerais, o tratamento com inoculação + reinoculação do rizóbio resultou no menor valor de incremento da produtividade (1156,11 kg ha⁻¹). Resultados semelhantes foram relatados por Pelegrin et al. (2009), os quais evidenciaram maiores IP com a aplicação de N-mineral que nos tratamentos com inoculação e sem adubação nitrogenada.

Figura 19 – Incremento da produtividade de três cultivares (IPR Andorinha, IPR Campos Gerais e TAA Dama) em função das diferentes formas para fornecimento de N em dois experimentos de campo conduzidos em Botucatu. Letras minúsculas comparam as formas de fornecimento de N dentro de cada cultivar com valor de $p < 0,05$ de acordo com o teste de Tukey



Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral com 60 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral com 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

Houve acréscimo da receita bruta (ARB) e líquida (ARL) em todas as condições, com ajustes de linhas de tendência com comportamento semelhante, nas duas variáveis, em todas as cultivares ao longo dos anos amostrados (Figura 20 e 21). Independentemente do ano amostrado, todos os tratamentos, seja ele inoculado ou com fertilização de N-mineral, acrescentaram acréscimos nas receitas brutas e líquidas, em relação ao tratamento controle. Isto ocorreu devido as produtividades de grãos, que nos tratamentos principais (N-mineral e inoculados) sempre foram maiores que no tratamento controle, o que levou à um incremento de produtividade nos tratamentos fertilizados com N-mineral e inoculados (Figura 19). Resultado similar a este foi relatado por Pelegrin et al. (2009), os quais observaram que em todos os tratamentos correspondentes à inoculação e, ou, aplicação de adubo nitrogenado acrescentam acréscimos de produtividade, de receita bruta e receita líquida, em relação ao tratamento testemunha (sem inoculação e sem adubação nitrogenada)

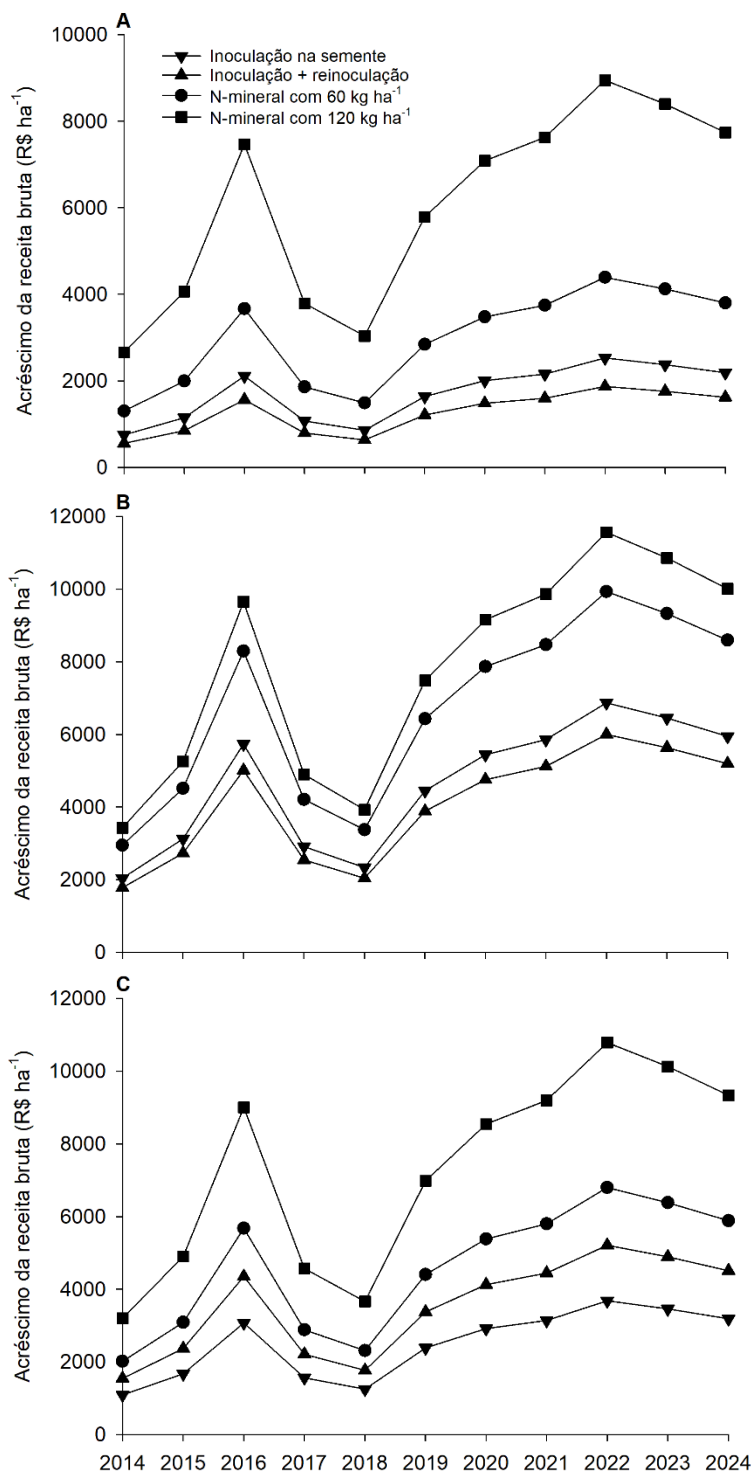
Em todos os anos amostrados os maiores valores para ARB e ARL, na devida ordem, foram para a fertilização com N-mineral na dose de 120 kg ha⁻¹, seguido da fertilização com 60 kg ha⁻¹, nas cultivares IPR Andorinha (Figuras 20A e 21A), IPR Campos Gerais (Figuras 20B e 21B) e TAA Dama (Figuras 20C e 21C). Isto

proporcionou um acréscimo médio na receita bruta e líquida das cultivares IPR Andorinha, IPR Campos Gerais e TAA Dama de R\$ 6.054,49 e R\$ 5.433,39; R\$ 7.825,33 e R\$ 7.204,23; R\$ 7.300,16 e R\$ 6.679,06 no tratamento com 120 kg ha⁻¹ de N-mineral, respectivamente. Seguindo está mesma lógica, para o tratamento com 60 kg ha⁻¹ de N-mineral, os ARB e ARL atingiram, respectivamente, um acréscimo de R\$ 2.970,90 e R\$ 2.647,05 para a cultivar IPR Andorinha; R\$ 6.721,70 e R\$ 6.397,85 para IPR Campos Gerais; R\$ 4.601,91 e R\$ 4.278,06 para TAA Dama (Figura 20 e 21).

Quanto aos tratamentos inoculados, a inoculação via semente apresentou os maiores valores de ARB e ARL para as cultivares IPR Andorinha e IPR Campos gerais em todos os anos, ao passo que a inoculação + reinoculação resultou nos menores valores para essas variáveis nas referidas cultivares. A diferença foi de até 35 e 41% a mais no ARB e ARL, respectivamente, no tratamento com inoculação via semente em relação ao inoculado + reinoculado para a cultivar IPR Andorinha. Seguindo o mesmo comparativo, para a IPR Campos Gerais, o tratamento com inoculação exclusivamente na semente aumentou os ARB e ARL em até 15 e 16%, respectivamente, em relação ao tratamento com inoculação + reinoculação (Figuras 20A, 20B, 21A e 21B). No entanto, para a cultivar TAA Dama, o ARB e ARL no tratamento que recebeu inoculação + reinoculação foi maior que no tratamento com inoculação via semente, em todos os anos amostrados. Em média, o ARB e ARL foi 42 e 40% superior no tratamento com inoculação + reinoculação do rizóbio em pós emergência, em relação ao inoculado exclusivamente na semente, respectivamente (Figuras 20C e 21C).

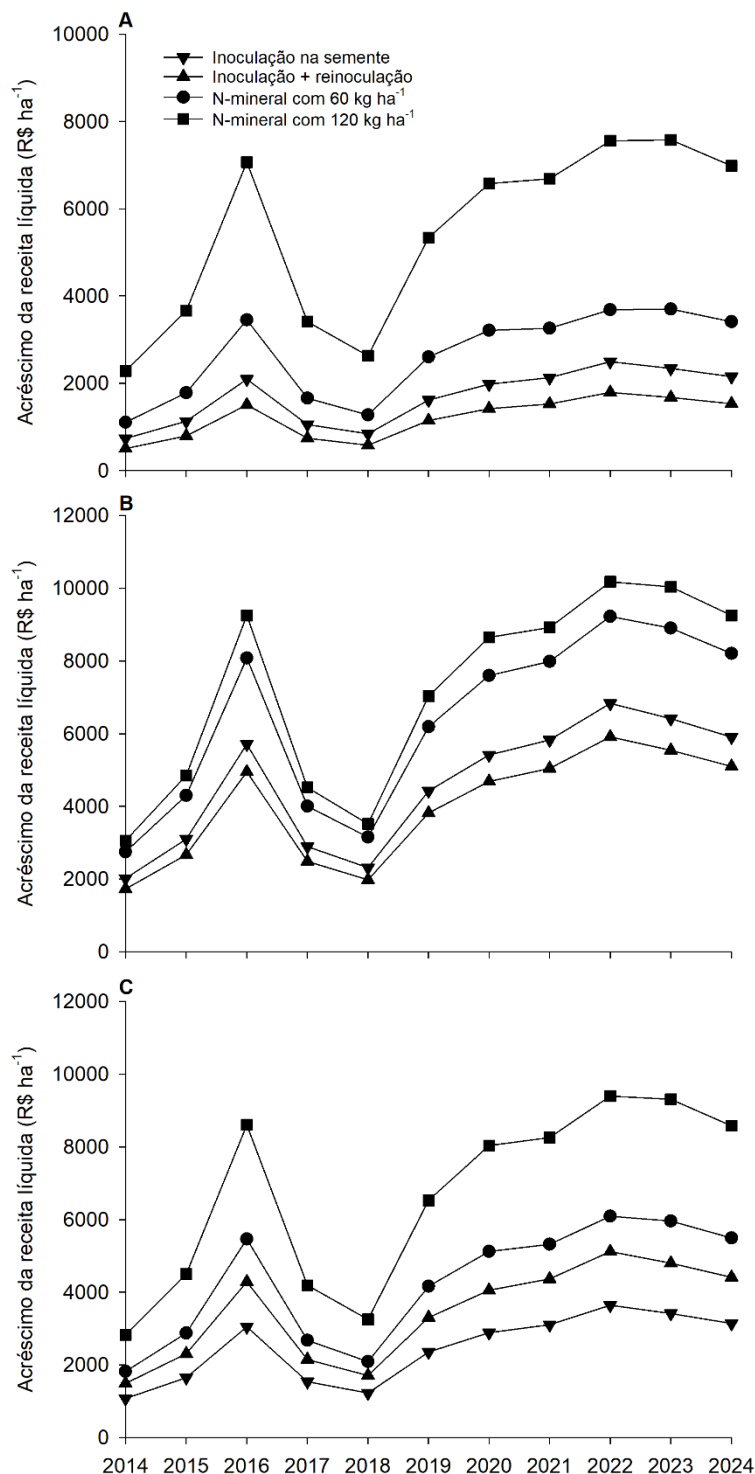
Resumidamente, a depender da cultivar utilizada, variações nos acréscimos da receita bruta e líquida nos diferentes tratamentos com inoculação rizobial podem ocorrer. Isto se deve, principalmente, ao custo do inoculante, via semente, por hectare. Como já mencionado anteriormente, o peso de sementes é um fator determinante na quantidade de inoculante a ser utilizado. Portanto, para a cultivar TAA Dama foi necessária uma maior quantidade de inoculante turfoso que nas demais cultivares, o que resultou em um custo diferente deste tratamento para a referida cultivar. Soma-se a isto, também, o incremento da produtividade, que é utilizado para calcular o ARB, onde a TAA Dama trouxe maiores incrementos no tratamento com inoculação + reinoculação que no tratamento com inoculação via semente (Figura 19).

Figura 20 – Acréscimo da receita bruta (ARB), em função dos anos (2014-2024), de dois experimentos conduzidos em Botucatu com três cultivares (IPR Andorinha – “A”, IPR Campos Gerais – “B” e TAA Dama – “C”) e quatro formas para fornecimento de N



Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral com 60 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral com 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

Figura 21 – Acréscimo da receita líquida (ARL), em função dos anos (2014-2024), de dois experimentos conduzidos em Botucatu com três cultivares (IPR Andorinha – “A”, IPR Campos Gerais – “B” e TAA Dama – “C”) e quatro formas para fornecimento de N



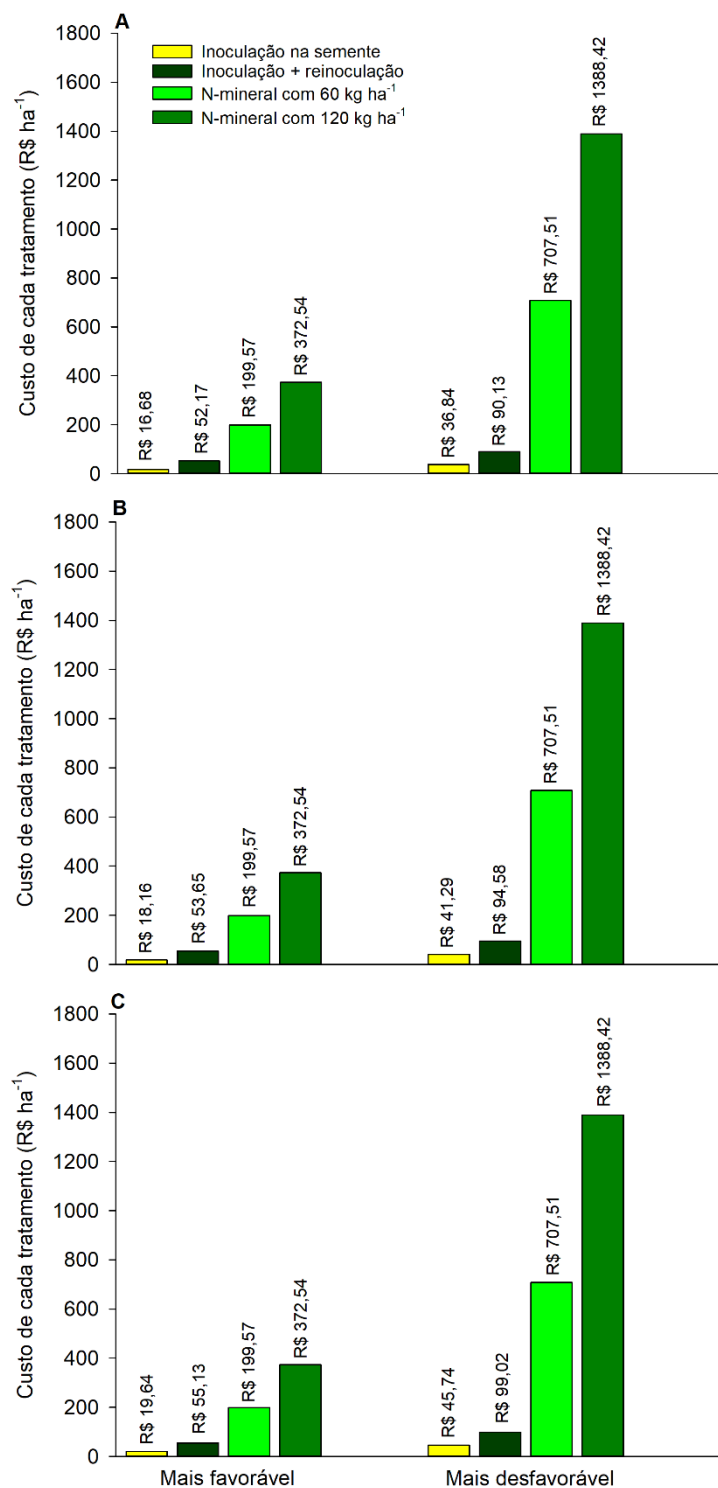
Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral com 60 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral com 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

Em dois possíveis cenários econômicos, onde um seria o mais favorável para a produção do feijão-comum (preço do fertilizante/inoculante menor e da saca de feijão maior) e o outro o mais desfavorável (preço do fertilizante/inoculante maior e da saca de feijão menor), o CT foi sempre maior com a fertilização de N-mineral na dose de 120 kg ha⁻¹ em todas as cultivares. O custo do tratamento com 120 kg ha⁻¹ de N-mineral foi da ordem de R\$ 1.388,42 e R\$ 372,54 nos cenários mais desfavorável e favorável, respectivamente (Figura 22). Neste mesmo comparativo, para o tratamento com 60 kg ha⁻¹ de N-mineral, o custo deste tratamento foi de R\$ 707,51 no cenário mais desfavorável e R\$ 372,54 no mais favorável, em todas as cultivares estudadas (Figura 22).

Variações nos custos dos tratamentos inoculados para cada cultivar, em ambos os cenários, foram observados. No tratamento com inoculação exclusivamente na semente, a cultivar TAA Dama apresentou os maiores CT em ambos os cenários (R\$ 19,64 e R\$ 45,74 – Figura 22C), seguida pela IPR Campos Gerais (R\$ 18,16 e R\$ 41,29 – Figura 22B) e IPR Andorinha (R\$ 16,68 e R\$ 36,84 – Figura 22A). O mesmo ocorreu para a inoculação via semente + reinoculação em pós emergência, em que a TAA Dama (R\$ 55,13 e R\$ 99,02 – Figura 22C) sobressaiu os custos dos tratamentos nos cenários mais favoráveis e desfavoráveis, em relação as cultivares IPR Campos Gerais (R\$ 53,65 e R\$ 94,58 – Figura 22B) e IPR Andorinha (R\$ 52,17 e R\$ 90,13 – Figura 22A).

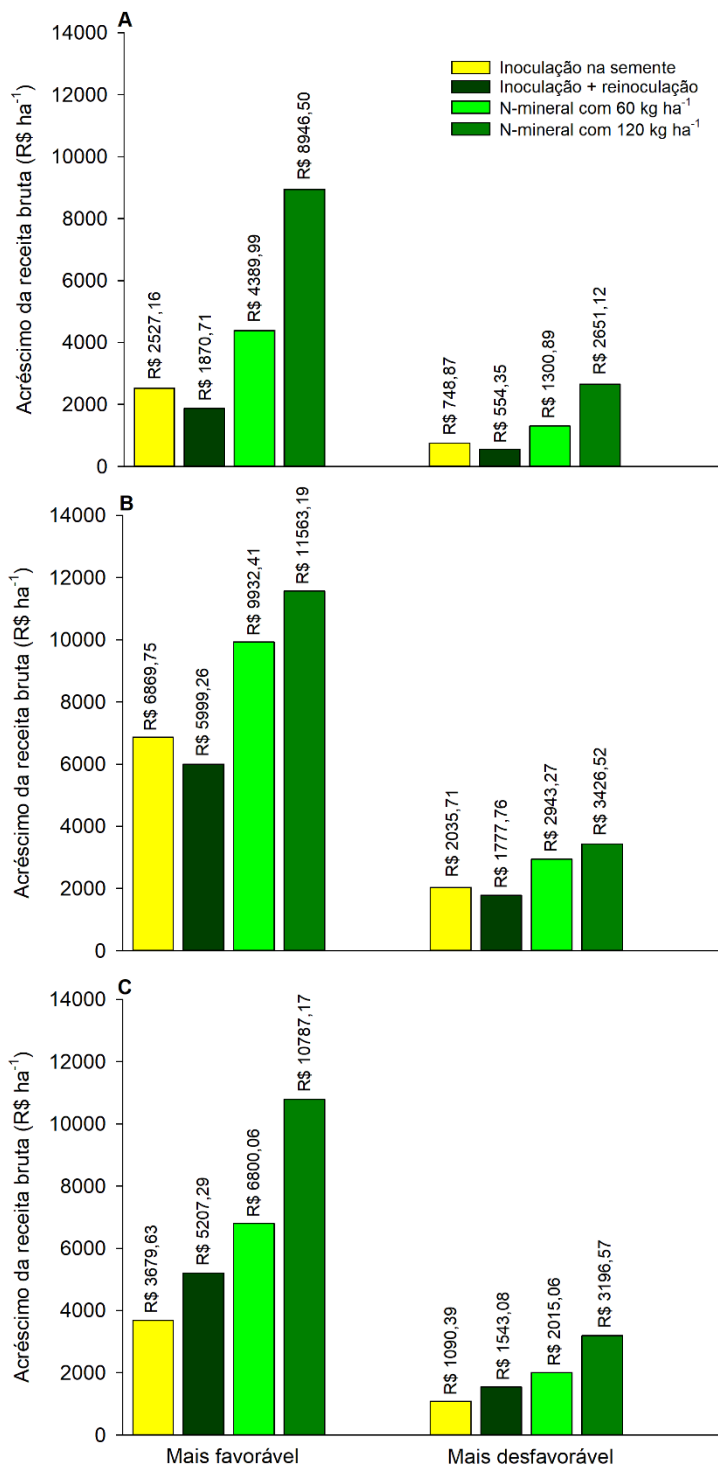
Os acréscimos nas receitas, bruta e líquida (ARB e ARL), em dois possíveis cenários econômicos, estão demonstrados nas Figuras 23 e 24. A tendência dos maiores ARB e ARL descritas anteriormente, para o tratamento com 60 e 120 kg ha⁻¹ de N, volta a ocorrer em ambos os cenários estudados para todas as cultivares. Ao passo que a inoculação via semente resultou nos maiores valores de ARB e ARL, em relação a inoculação + reinoculação, nas cultivares IPR Andorinha e IPR Campos Gerais (Figura 23A, 23B, 24A, 24B). Já para a TAA Dama, o contrário foi observado, com maiores valores para ARB e ARL obtidos no tratamento com inoculação + reinoculação, em relação a inoculação via semente (Figura 23C e 24C).

Figura 22 – Simulação para o custo de cada tratamento (CT) de dois experimentos conduzidos em Botucatu com três cultivares (IPR Andorinha – “A”, IPR Campos Gerais – “B” e TAA Dama – “C”) e quatro formas para fornecimento de N em função de dois cenários econômicos (mais favorável e mais desfavorável)



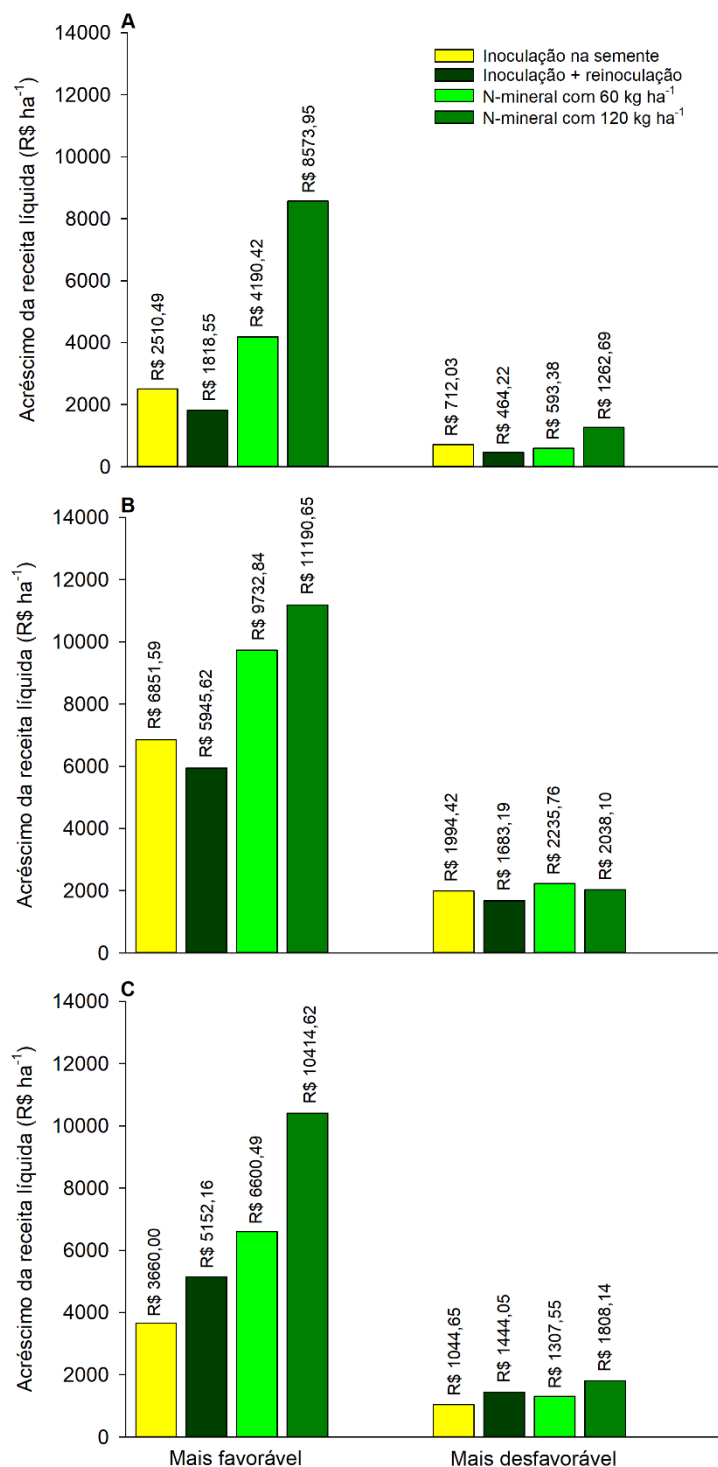
Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral com 60 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral com 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

Figura 23 – Simulação para o acréscimo da receita bruta (ARB) de dois experimentos conduzidos em Botucatu com três cultivares (IPR Andorinha – “A”, IPR Campos Gerais – “B” e TAA Dama – “C”) e quatro formas para fornecimento de N em função de dois cenários econômicos (mais favorável e mais desfavorável)



Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral com 60 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral com 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

Figura 24 – Simulação para o acréscimo da receita líquida (ARL) de dois experimentos conduzidos em Botucatu com três cultivares (IPR Andorinha – “A”, IPR Campos Gerais – “B” e TAA Dama – “C”) e quatro formas para fornecimento de N em função de dois cenários econômicos (mais favorável e mais desfavorável)



Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral com 60 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral com 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

Outra métrica de importância econômica, além dos já mencionados, é o retorno que se terá sobre o capital investido (RCI), e assim os maiores retornos ficaram por conta dos tratamentos inoculados (inoculação e inoculação + reinoculação) que os tratamentos fertilizados com N-mineral (60 e 120 kg ha⁻¹), em ambos os possíveis cenários e em todas as cultivares (Tabela 21). Resultados semelhantes foram relatados por Baumgärtner et al. (2018), em que o retorno sobre o capital investido, também, foi maior no tratamento inoculado que não recebeu adubação nitrogenada. Isto se deve, segundo os autores mencionados, ao baixo custo do inoculante, em relação ao insumo nitrogenado.

A resposta da cultura de feijão, em termos produtivos, aos tratamentos inoculados, mesmo que mais baixa que à fertilização com N-mineral, o retorno médio sobre o capital investido dos tratamentos inoculados, em um cenário mais favorável, foi de 92,7% enquanto com N-mineral foi de 22% para a cultivar IPR Andorinha. Para a IPR Campos Gerais, o retorno foi de 244,1% nos tratamentos inoculados e de 39,4% nos tratamentos fertilizados com N-mineral. Na cultivar TAA Dama, houve um RCI de 140,0 e 30,6% para os tratamentos inoculados e fertilizados com N-mineral, respectivamente. O mesmo se repetiu no cenário mais desfavorável, com um retorno médio de 12,33 e 19% para os tratamentos inoculados, ao passo que o retorno médio sobre o capital investido nos tratamentos fertilizados com N-mineral foram de 1,2 e 1,5% para as cultivares IPR Andorinha, IPR Campos Gerais e TAA Dama, respectivamente (Tabela 21).

Estes dados revelam a importância de se realizar a inoculação, considerando o seu baixo custo em relação a adubação mineral e o maior retorno sobre o capital investido. Normalmente, segundo Baumgärtner et al. (2018), quanto maior o investimento menor a porcentagem de retorno. No entanto, isto não significa que não seja lucrativo e, em muitos casos, o ganho em produtividade não acompanha o aumento do custo de produção com a suplementação mineral. Isto pode ser observado no ARL, cujos melhores resultados foram para os tratamentos com N-mineral.

Tabela 21 - Simulação para o retorno sobre o capital investido (RCI) de dois experimentos conduzidos em Botucatu com três cultivares (IPR Andorinha – “A”, IPR Campos Gerais – “B” e TAA Dama – “C”) e quatro formas para fornecimento de N em função de dois cenários econômicos (mais favorável e mais desfavorável)

Fornecimento de N	Mais favorável (%)	Mais desfavorável (%)	% de redução ⁽¹⁾
IPR Andorinha			
Inoculação na semente	150,5	19,3	6,8
Inoculação + reinoculação	34,9	5,2	5,8
N-mineral com 60 kg ha ⁻¹	21,0	0,8	24,0
N-mineral com 120 kg ha ⁻¹	23,0	0,9	24,3
IPR Campos Gerais			
Inoculação na semente	377,3	48,3	6,8
Inoculação + reinoculação	110,8	17,8	5,2
N-mineral com 60 kg ha ⁻¹	48,8	3,2	14,4
N-mineral com 120 kg ha ⁻¹	30,0	1,5	19,5
TAA Dama			
Inoculação na semente	186,4	22,8	7,2
Inoculação + reinoculação	93,5	14,6	5,4
N-mineral com 60 kg ha ⁻¹	33,1	1,8	16,9
N-mineral com 120 kg ha ⁻¹	28,0	1,3	20,5

⁽¹⁾Percentual de redução calculado com base na diferença do retorno sobre o capital investido do cenário mais favorável em relação ao mais desfavorável. Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral com 60 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral com 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

A análise econômica dos experimentos de campo com cultivares de feijão-comum em Botucatu demonstra a complexidade das decisões de manejo frente à volatilidade dos mercados de insumos e produtos agrícolas. Os resultados evidenciam que, embora a fertilização nitrogenada com N-mineral em doses mais elevadas (120 kg ha⁻¹) proporcione os maiores IP e, conseqüentemente, os maiores ARB e ARL, ela também acarreta custos de produção significativamente mais elevados. Essa elevação de custos é particularmente acentuada em cenários econômicos desfavoráveis, influenciados por fatores externos como pandemias e conflitos geopolíticos que afetam a cadeia de suprimentos de fertilizantes.

Por outro lado, a inoculação com *Rhizobium*, apesar de gerar IP potencialmente menores em comparação com a fertilização mineral, destaca-se por seu custo-benefício superior. Os tratamentos inoculados apresentaram um RCI consistentemente mais elevado em todas as cultivares e em ambos os cenários econômicos, favorável e desfavorável. Isso se deve, principalmente, ao baixo custo do inoculante em relação aos fertilizantes nitrogenados, conforme corroborado por Baumgärtner et al. (2018). Além disso, a pesquisa sugere que, mesmo que o ganho

em produtividade de grãos não seja tão expressivo quanto o da adubação mineral, o menor investimento inicial e o maior retorno percentual sobre o capital investido tornam a inoculação uma estratégia economicamente mais vantajosa e resiliente a choques de mercado, deixando também o produtor menos sujeito a maiores perdas financeiras no caso de frustrações de produtividades.

É crucial considerar as especificidades de cada cultivar, como demonstrado pela cv. TAA Dama, que respondeu de forma diferenciada aos tratamentos de inoculação, apresentando melhores resultados com a inoculação + reinoculação em termos de acréscimo de receita. Isso ressalta a importância de estudos aprofundados e regionalizados para otimizar as práticas de manejo e maximizar a rentabilidade dos produtores. Em suma, a inoculação com *Rhizobium* emerge como uma alternativa economicamente viável e sustentável para o cultivo do feijão-comum, especialmente em um contexto de incertezas econômicas e flutuações nos preços dos insumos, oferecendo um retorno financeiro mais robusto sobre o capital investido, mesmo que a produtividade absoluta seja ligeiramente inferior à obtida com altas doses de fertilizantes nitrogenados.

As limitações deste estudo incluem a variabilidade da eficácia da inoculação em diferentes locais e cultivares, sugerindo a necessidade de mais pesquisas para identificar as condições ideais de aplicação. Além disso, a comparação direta com a fertilização mineral em altas doses ressalta que a reinoculação, embora promissora, ainda não substitui completamente a necessidade de N em todos os cenários.

Para estudos futuros, sugere-se aprofundar a pesquisa sobre os fatores que influenciam a variabilidade da reinoculação, como tipos de solo, condições climáticas e interações com outras práticas de manejo. A investigação de novas estirpes de *Rhizobium* e formulações de inoculantes também pode otimizar ainda mais a FBN. Assim sendo, a busca por soluções agrícolas sustentáveis e economicamente viáveis é contínua, e a reinoculação de *Rhizobium* representa um passo significativo nessa direção.

5 CONCLUSÕES

O experimento em casa de vegetação, demonstrou que a reinoculação aumentou ligeiramente a nodulação do feijão-comum, especialmente em doses mais elevadas do inoculante líquido (800-1200 mL ha⁻¹) e em estádios iniciais de crescimento (R6). No entanto, esses ganhos não refletiram consistentemente em características agronômicas superiores em comparação com a fertilização com N-mineral. Em condições controladas de casa de vegetação, a fertilização com N-mineral melhorou os índices de clorofila, a biomassa da parte aérea e os componentes agronômicos, mas ao custo de suprimir a nodulação.

A variabilidade das cultivares influenciou significativamente os resultados, principalmente em condições de campo. A reinoculação em pós-emergência tem potencial para aumentar a nodulação, o acúmulo de N e a produtividade de grãos em algumas cultivares, especialmente na TAA Dama e IPR Campos Gerais. Quanto o desempenho agrônomo e produtivo, a inoculação associada a reinoculação resultou em produtividades competitivas, acima de 3,0 t ha⁻¹, enquanto a adubação nitrogenada (120 kg ha⁻¹) elevou a produtividade a patamares superiores a 5,0 t ha⁻¹, porém com maior custo e menor retorno econômico.

Os custos de produção foram significativamente maiores nos tratamentos com adubação nitrogenada, enquanto os tratamentos inoculados proporcionaram maior retorno sobre o capital investido. A inoculação proporcionou retorno médio até seis vezes superior ao obtido com a adubação mineral. Mesmo em cenários econômicos desfavoráveis, a prática de inoculação e reinoculação manteve vantagem competitiva pelo baixo custo do insumo. A cultivar TAA Dama, em relação as demais cultivares, destacou-se ao gerar maior receita líquida quando submetida à inoculação e reinoculação.

REFERÊNCIAS

- AIRES, B. C.; SORATTO, R. P.; GUIDORIZZI, F. V. C. Grain yield and quality of common bean cultivars in response to nitrogen. **Científica**, v. 47, n. 2, p. 231–238, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.15361/1984-5529.2019v47n2p231-238>
- ALMEIDA, Q. R. *et al.* Reinoculation of topdressing *Rhizobium tropici* combined or not with *Azospirillum brasilense* in common bean. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 52, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632022v5273419>
- ALVES, A. F. *et al.* Densidades populacionais para cultivares alternativas de feijoeiro no norte de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, n. 6, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542009000600006>
- AMBROSANO, E. J. *et al.* Leguminosas e oleaginosas. In: RAIJ, B. V. *et al.* (Eds.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1997. p. 189–203 (Boletim Técnico 100).
- 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, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1166376>
- ARGAW, A.; MULETA, D. Effect of genotypes-*Rhizobium*-environment interaction on nodulation and productivity of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in eastern Ethiopia. **Environmental Systems Research**, v. 6, p. 1–16, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40068-017-0091-8>
- ASERSE, A. A. *et al.* Rhizobial inoculation improves drought tolerance, biomass and grain yields of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and soybean (*Glycine max* L.) at Halaba and Boricha in Southern Ethiopia. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 66, n. 4, p. 488–501, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1624724>
- BARBANO, M. T. *et al.* Comparação entre valores observados e estimados de duração dos diferentes subperíodos de desenvolvimento da cultura do feijoeiro. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9 p. 103–110, 2001.
- BARBOSA FILHO, M. P.; SILVA, O. F. Adubação de cobertura do feijoeiro irrigado com uréia fertilizante em plantio direto: um ótimo negócio. **Informações Agronômicas**, n. 93, 2001.
- BARROS, R. L. N. *et al.* Growth and yield of common bean as affected by seed inoculation with *Rhizobium* and nitrogen fertilization. **Experimental Agriculture**, v. 54, n. 1, p. 16–30, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1017/S001447971600065X>
- BARROS, R. L. N. *et al.* Interação entre inoculação com rizóbio e adubação nitrogenada de plantio na produtividade do feijoeiro nas épocas da seca e das águas. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 4, p. 1443–1450, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n4p1443>

BAUMGÄRTNER, L. C. *et al.* Uso da inoculação no feijoeiro comum em duas épocas de cultivo sob sistema de semeadura direta. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 02, p. 628–642, 2018.

BRITO, L. F. *et al.* Resposta do feijoeiro comum à inoculação com rizóbio e suplementação com nitrogênio mineral em dois biomas brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 4, p. 981–992, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140322>

BRITO, M. M. P.; MURAOKA, T.; SILVA, E. C. Contribuição da fixação biológica de nitrogênio, fertilização nitrogenada e nitrogênio do solo no desenvolvimento de feijão e caupi. **Bragantia**, v. 70, n. 1, p. 206–215, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052011000100027>

BRITO, M. M. P.; MURAOKA, T.; SILVA, E. C. Marcha de absorção do nitrogênio do solo, do fertilizante e da fixação simbiótica em feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) walp.) e feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) determinada com uso de ¹⁵N. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400014>

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, F. R. *et al.* **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 375–470.

CARDOSO, R. M.; FERREIRA, E. P. B. Assessment of consortia inoculation effects on the agronomical performance of the common bean. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 52. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1908319>

CASAROLI, D.; LIER, Q. J. V. Critérios para determinação da capacidade de vaso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 59–66, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100007>

CATROUX, G.; HARTMANN, A.; REVELLIN, C. Trends in rhizobial inoculant production and use. **Plant and Soil**, v. 230, p. 21–30, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1004777115628>

CHAVES, J. S. *et al.* Produtividade do feijão-caupi sob inoculação em área alterada no estado de Roraima – Brasil. **Nucleus**, v. 15, n. 2, p. 319–324, 2018.

CHEKANAI, V.; CHIKOWO, R.; VANLAUWE, B. Response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) to nitrogen, phosphorus and thizobia inoculation across variable soils in Zimbabwe. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 266, p. 167–173, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.08.010>

COELHO, L. G. F. *et al.* **A inoculação do feijoeiro no Brasil**: Alternativas para aumentar a produtividade utilizando microrganismos promotores do crescimento vegetal. Embrapa Cerrados, 2021. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1142446/1/Doc-384.pdf>. Acesso em: 14 de set. 2024.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Brasília: Conab. v.1, n.1, 2024a.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Preços Agropecuários**. 2024. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/precos>>. Acesso em: 19 de ago. 2024b.

CRUSCIOL, C. A. C. *et al.* Fontes e doses de nitrogênio para o feijoeiro em sucessão a gramíneas no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1545–1552, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000600031>

CUNHA, A. R.; MARTINS, D. Classificação climática para os municípios de Botucatu e São Miguel, SP. **Irriga**, v. 14, n. 1, p. 1–11, 2009. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2009v14n1p1-11>

DEAKER, R.; ROUGHLEY, R. J.; KENNEDY, I. R. Legume seed inoculation technology – a review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 36, n. 8, p. 1275–1288, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.04.009>

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação dos solos**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2013. 353p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed: Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Conhecendo a fenologia do feijoeiro e seus aspectos fitotécnicos**. Brasília: Embrapa Arroz e Feijão, 2018. 59p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Linha do tempo: fixação biológica de nitrogênio (FBN)**. 2020. Disponível em: <https://sistemas.sede.embrapa.br/40anos/index.php/linha_do_tempo/historia/9>. Acesso em: 11 de mar. 2021.

FAGAN, E. B. **Fisiologia e nutrição mineral de plantas**. Patos de Minas, 2011. 151p.

FAGERIA, N. K. Role of soil organic matter in maintaining sustainability of cropping systems. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 43, p. 2063–2113, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2012.697234>

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Enhancing Nitrogen Use Efficiency in Crop Plants. **Advances in Agronomy**, v. 88, p. 97–185, 2005. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)88004-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)88004-6)

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de feijão**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007. 386p.

FARHAN, M. *et al.* Plant nitrogen metabolism: balancing resilience to nutritional stress and abiotic challenges. **Phyton-International Journal of Experimental Botany**, v. 93, n. 3, p. 581–609, 2024. DOI: <https://doi.org/10.32604/phyton.2024.046857>

FERREIRA, D. F. SISVAR: A computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, p: 1039–1042, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>

FIDELIS, R. R. *et al.* Determinação do teor de proteína em genótipos de feijão comum cultivados em diferentes níveis de nitrogênio. **Ambiência**, v. 15, n. 1, p. 161–172, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5935/ambiencia.2019.01.10>

FONSECA, G. G. *et al.* Resposta de cultivares de feijoeiro-comum à inoculação das sementes com duas estirpes de rizóbio. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 6, p. 1778–1787, 2013.

GASPAR, A. P. *et al.* Dry matter and nitrogen uptake, partitioning, and removal across a wide range of soybean seed yield levels. **Crop Science**, v. 57, n. 4, p. 2170–2182, 2017. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.05.0322>

GASTAL, F.; LEMAIRE, G. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, n. 370, p. 789–799, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.370.789>

GAUDINIER, A. *et al.* Transcriptional regulation of nitrogen-associated metabolism and growth. **Nature**, v. 563, n. 7730, p. 259–280, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0656-3>

GLODOWSKA, M.; WOZNIAK, M. Changes in soil microbial activity and community composition as a result of selected agricultural practices. **Agricultural Sciences**, v. 10, p. 330–351, 2019. DOI: <https://doi.org/10.4236/as.2019.103028>

GONÇALVES, G. M. C. **Estudo comparativo de cultivares de feijão carioca quanto ao potencial produtivo, resistência à estresses bióticos e abióticos e qualidade de grãos**. 2022. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical e Subtropical). Instituto Agrônomo Pós-Graduação. Campinas, SP. 2022.

GUIDORIZZI, F. V. C. *et al.* Extração e exportação de nutrientes por cultivares de Feijão-comum e manejo da adubação para altas produtividades. **Informações Agronômicas**, n. 17, 2023.

GUIMARÃES, R. A. M. *et al.* Resposta de cultivares de feijoeiro a adubação nitrogenada em diferentes estádios fenológicos. **Global Science and Technology**, v. 10, n. 1, p. 136–148, 2017.

HEINEMANN, A. B. *et al.* Strategies for fungicide application based on the yield response of common bean genotypes under El Niño-Southern Oscillation (ENSO). **European Journal of Agronomy**, v. 154, p. 127090, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127090>

HIOLANDA, R. *et al.* Desempenho de genótipo de feijão carioca no Cerrado Central do Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 41, n. 3, p. 815–824, 2018. DOI: <https://doi.org/10.19084/RCA17285>

HIREL, B. *et al.* Improving nitrogen use efficiency in crops for sustainable agriculture. **Sustainability**, v. 3, n. 9, p. 1452–1485, 2011. DOI: <https://doi.org/10.3390/su3091452>

- HIREL, B.; LEMAIRE, G. From agronomy and ecophysiology to molecular genetics for improving nitrogen use efficiency in crops. **Journal of Crop Improvement**, v. 15, n. 2, p. 213–257, 2006. DOI: https://doi.org/10.1300/J411v15n02_07
- HOFFMANN JÚNIOR, L. *et al.* Resposta de cultivares de feijão à alta temperatura do ar no período reprodutivo. **Ciência Rural**, v. 37, n. 6, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782007000600006>
- HOLLAND, J. E. *et al.* Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: A review. **Science of the Total Environment**, v. 610-611, p. 316–332, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.020>
- HUNGRIA, M. Metabolismo do carbono e do nitrogênio nos nódulos. In: HUNGRIA, M.; ARAUJO, R. S. (Eds.). **Manual de métodos empregados em estudos de microbiologia agrícola**. Brasília: Embrapa – SPI, 1994. p. 249–283.
- HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; MENDES, I. C. **A importância do processo de fixação biológica do nitrogênio para a cultura da soja**: componente essencial para a competitividade do produto brasileiro. Londrina, Embrapa Soja, 2007.
- HUNGRIA, M.; CAMPOS, R. J.; NOGUEIRA, M. A. **A pesquisa em Fixação Biológica do Nitrogênio na Embrapa Soja**: passado, presente e perspectivas futuras. In.: Anais da XVI Relare, Londrina/PR, 2012.
- HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S. Co-inoculation of soybeans and common beans with rhizobia and azospirilla: strategies to improve sustainability. **Biology and Fertility of Soils**, v. 49, p. 791–801, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-012-0771-5>
- IAPAR – Instituto Agrônômico do Paraná. **Cultivar de Feijão IPR Andorinha**. IAPAR: Londrinha, PR. Folder IPR Andorinha, 2013.
- IAPAR – Instituto Agrônômico do Paraná. **Cultivar IPR Campos Gerais**. IAPAR: Londrinha, PR. Folder IPR Campos Gerais, 2011.
- JESUS, E. C. *et al.* Co-inoculation of *Bradyrhizobium* stimulates the symbiosis efficiency of *Rhizobium* with common bean. **Plant and Soil**, v. 425, p. 201–215, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3541-1>
- KARAVIDAS, I. *et al.* Agronomic practices to increase the yield and quality of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.): A systematic review. **Agronomy**, v. 12, n. 2, p. 271, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12020271>
- KHARE, N.; KHARE, P.; SINGH, S. Molecular and physiological concepts: macronutrients in crop plant growth and development. **Agricultural Crop Improvement**. CRC Press, p. 148–164, 2025.
- KIKUTI, H. *et al.* Teores de macronutrientes na parte aérea do feijoeiro em função de doses de nitrogênio e fósforo. **Bragantia**, v. 65, n. 2, p. 347–354, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052006000200017>

- KOTZ-GURGACZ, T. E.; SORATTO, R. P.; GUIDORIZZI, F. V. C. Foliar and topdressing application of nitrogen to the common bean crop. **Crop Science**, v. 53, n. 12, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018001200005>
- LEAL, F. T. *et al.* Use efficiency and responsivity to nitrogen of common bean cultivars. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 43, p. 1–13, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1413-7054201943004919>
- LISCIANI, S. *et al.* Legumes and common beans in sustainable diets: nutritional quality, environmental benefits, spread and use in food preparations. **Frontiers in Nutrition**, v. 11, p. 1385232, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1385232>
- MA, A. *et al.* Mitigation of ammonia volatilization and nitrate leaching via loss control urea triggered H-bond forces. **Scientific Reports**, v. 9, p. 1–9, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51566-2>
- MAGALHÃES, A. C. N. Análise quantitativa do crescimento. *In*: FERRI, M.G. **Fisiologia vegetal**. São Paulo, EPU/USP, 1979. v.1. p.331-350.
- MAIA, S. C. M. *et al.* Criteria for topdressing nitrogen application to common bean using chlorophyll meter. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 7, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2017000700005>
- MAIA, S. C. M. *et al.* The nitrogen sufficiency index underlying estimates of nitrogen fertilization requirements of common bean. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000100019>
- MAITRA, S. *et al.* Intercropping system - A low input agricultural strategy for food and environmental security. **Agronomy**, v. 11, n. 2, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11020343>
- MALAVOLTA, E., VITTI, G. C., OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Potafós, 1997. 308p.
- MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Registro nacional de cultivares**. Brasília, DF, 2024. Disponível em: https://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares_registradas.php. Acesso em: 06 de jan. 2025.
- MARTINS, J. T. *et al.* Diazotrophic bacteria increase yield and profitability in organic cultivation of common bean. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, n. 2, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n2e272029>
- MIKHA, M. M.; RICE, C. W. Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 68, p. 809–816, 2004. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.8090>
- MOREIRA, L. P.; OLIVEIRA, A. P. S.; FERREIRA, E. P. B. Nodulation, contribution of biological N₂ fixation, and productivity of the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) inoculated with rhizobia isolates. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 6, p. 644–651, 2017.

MORETTI, L. G. *et al.* Can additional inoculations increase soybean nodulation and grain yield? **Agronomy Journal**, v. 110, n. 2, p. 715–721, 2018. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2017.09.0540>

MWENDA, G. M. *et al.* Competition in the *Phaseolus vulgaris*-Rhizobium symbiosis and the role of resident soil rhizobia in determining the outcomes of inoculation. **Plant and Soil**, v. 487, p. 61–77, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-023-05903-0>

NOGUEIRA, G. H. F.; FERREIRA, D. M.; LIMA, E. A. Impacto da alta dos preços dos fertilizantes sobre itens da cesta básica: uma análise durante a covid-19 e a guerra na Ucrânia. **Multitemas**, v. 30 n. 74, p. 203–227, 2025. DOI: <http://dx.doi.org/10.20435/multi.v30i74.4639>

NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Fisiologia da simbiose *Rhizobium*-leguminosa. In: *Biologia dos microrganismos fixadores de nitrogênio*. Embrapa Soja, Londrina, PR, p. 111–146, 2006.

NUNES, H. D. *et al.* Agronomic performance, quality and nitrogen use efficiency by common bean cultivars. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 7, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1849292>

NYAWADE, S. O. *et al.* Short-term dynamics of soil organic matter fractions and microbial activity in smallholder legume intercropping systems. **Applied Soil Ecology**, v. 142, p. 123–135, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.04.015>

OLIVEIRA, C. A. B.; PELÁ, G. M.; PELÁ, A. Inoculação com *Rhizobium tropici* e adubação foliar com molibdênio na cultura do feijão comum. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 4, n. 1, p. 43–50, 2017.

OLIVEIRA, C. P.; FONSECA, F. G.; SILVA, S. M. A. Produtividade do feijoeiro com inoculação e adubação nitrogenada em região central amazônica. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. 1, p. 1–13, 2021.

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, 2022. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v44i1.52475>

OLIVEIRA, L. F. C.; SARMENTO, P. H. L.; OLIVEIRA, M. G. C. **Fenologia**. Embrapa – Ageitec, 2023. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao/pre-producao/fenologia>>. Acesso em: 31 de dez. 2024.

OLIVEIRA, R. C.; SBARDELOTTO, J. M. Nodulação em diferentes variedades de feijão inoculadas com *Rhizobium tropici*. **Cultivando o Saber**, v. 4, n. 2, p. 46–52, 2011.

OLIVEIRA, V. R. *et al.* Qualidade nutricional e microbiológica de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) cozido com ou sem água de maceração. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 6, p.1912–1918, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000600034>

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 440p.

OSAKI, M. **Covid-19 e o mercado de insumos agrícolas**. CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. Departamento de Economia, Administração e Sociologia (ESALQ/USP). 2020. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/opinio-ao-cepea/covid-19-e-o-mercado-de-insumos-agricolas.aspx>>. Acessado em: 28 mar. 2025.

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

PELÁ, A. *et al.* Fontes de fósforo para adubação foliar na cultura do feijoeiro. **Scientia Agraria**, v. 10, n. 4, p. 313–318, 2009.

PELEGRI, R. *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: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000100023>

PEREIRA, C. S. *et al.* Formas de inoculação de bactérias fixadoras de nitrogênio na cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Tecno-Lógica**, v. 26, n. 2, 2022.

PEREIRA, V. G. C. *et al.* Exigências Agroclimáticas para a Cultura do Feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira De Energias Renováveis**, v. 3, n. 1, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5380/rber.v3i1.36917>

PEREZ, A. A. G. *et al.* Extração e exportação de nutrientes pelo feijoeiro adubado com nitrogênio, em diferentes tempos de implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 5, p. 1276–1287, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000500017>

QUINTELA, E. D. **Manejo integrado de pragas do feijoeiro**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2001. 28p.

R Core Team. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria, 2022. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acessado em: 21 jun. 2021.

RABELO, A. C. R. *et al.* Adubação nitrogenada na cultura do feijoeiro. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 15, n. 1, p. 825–841, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.5892/ruvrd.v15i1.3141>

RAIJ, B. *et al.* **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: IAC, 2001. 284p.

RAIJ, B. V. *et al.* **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2ª Ed. Revista e atualidade. Campinas: Instituto Agronômico, 1997.

RAPOSEIRAS, R. *et al.* Rhizobium strains competitiveness on bean nodulation in Cerrado soils. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 439–447, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000300010>

REBESCHINI, A. C. *et al.* Nitrogen application and inoculation with *Rhizobium tropici* on common bean in the fall/winter. **African Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 42, p. 3156–3163, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJAR2013.7982>

REICHERT, J. M. *et al.* Common bean in highly variable weather conditions, on sandy soils, and food security in a subtropical environment. **Food and Energy Security**, v. 4, n. 3, p. 219–237, 2015.

RENATO, N. S. *et al.* Influência dos métodos para cálculo de graus-dia em condições de aumento de temperatura para as culturas de milho e feijão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, p. 382–388, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000400004>

RIBEIRO, B. B. A. *et al.* Reinoculation in Topdressing of *Rhizobium tropici*, *Azospirillum brasilense*, and the Micronutrients Mo/Co in Common Bean. **Agronomy**, v. 14, n. 7, p. 1368, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14071368>

RIBEIRO, F. E. *et al.* Recomendações técnicas para o cultivo do feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. **Circular Técnica**, v. 89, 2011.

RITCHIE, H.; ROSADO, P.; ROSER, M. **Agricultural Production**. Our World in Data, 2023. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/agricultural-production>>. Acesso em: 01 de dez. 2024.

RODIÑO, A. P. *et al.* Variation for nodulation and plant yield of common bean genotypes and environmental effects on the genotype expression. **Plant and Soil**, v. 346, p. 349–361, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0823-x>

RUPELA, O. P. *et al.* Chickpea *rhizobium* populations: Survey of influence of season, soil depth and cropping pattern. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 19, n. 3, p. 247–252, 1987. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90005-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90005-8)

SALGADO, F. H. M. *et al.* Comportamento de genótipos de feijão, no período da entressafra, no sul do estado de Tocantins. **Bioscience Journal**, v. 27, n. 1, p. 52–58, 2011.

SAMAGO, T. Y.; ANNIYE, E. W.; DAKORA, F. D. Grain yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties is markedly increased by rhizobial inoculation and phosphorus application in Ethiopia. **Symbiosis**, v. 75, p. 245–255, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13199-017-0529-9>

SANTOS, T. E. B. *et al.* **Fixação Biológica de Nitrogênio no Feijoeiro**. In: PEIXOTO, N.; BERTI, M. P. S. Leguminosas: fontes seguras de proteína vegetal. Editora CRV, 2023.

SCHMIDHUBER, J.; QIAO, B. High input prices protract high food prices, creating a double burden for import-dependent countries. **FAO Food Outlook**, 2022.

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. 63, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02839-w>

SHIADE, S. R. G. *et al.* Nitrogen contribution in plants: recent agronomic approaches to improve nitrogen use efficiency. **Journal of Plant Nutrition**, v. 47, n. 2, p. 314–331, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2278656>

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

SigmaPlot. **Systat Software**. 2013. Inc. Version 12.5. San Jose, CA.

SILVA, A. V. *et al.* Aptidão edafoclimática e ambientes de produção agrícola da cultura do feijão. **Scientific Electronic Archives**, v. 13, n. 10, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.36560/131020201114>

SILVA, C. G. M.; MOREIRA, S. G. Nutritional demand and nutrient export by modern cultivars of common bean. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 57, p. e02248, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.02248>.

SILVA, M. L. S.; SILVA, M. A. D.; TREVIZAM, A. R. Influência do nitrogênio e enxofre na produção do feijoeiro. **Revista Agrogeoambiental**, v. 9, n. 3, p. 11–22, 2017. DOI: <https://doi.org/10.18406/2316-1817v9n32017899>

SILVA, V. S. G. *et al.* Systems of land use affecting nodulation and growth of tree legumes in different soils of the Brazilian semiarid area. **African Journal of Agricultural**, v. 11, n. 40, p. 3966–3974, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11603>

SORATTO, R. P. *et al.* Critical nitrogen dilution curve for estimating nitrogen nutrition index of common beans. **Field Crops Research**, v. 322, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109713>

SORATTO, R. P. *et al.* Effects of previous fall–winter crop on spring–summer soybean nutrition and seed yield under no-till system. **Agronomy**, v. 12, n. 12, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12122974>

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**, v. 37, n. 4, p. 1027–1042, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000400020>

SORATTO, R. P. *et al.* Plant density and nitrogen fertilization on common bean nutrition and yield. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 3, p. 670–678, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n315rc>

SORATTO, R. P. *et al.* Produtividade e qualidade dos grãos de feijão em função da aplicação de nitrogênio em cobertura e via foliar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 6, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600018>

SORATTO, R. P.; CARVALHO, M. A. C.; ARF, O. Nitrogênio em cobertura no feijoeiro cultivado em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 2, p. 259–265, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000200007>

SORATTO, R. P.; PEREZ, A. A. G.; FERNANDES, A. M. Age of no-till system and nitrogen management on common bean nutrition and yield. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 3, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj13.0439>

SOUSA, W. S. *et al.* Effects of *Rhizobium* inoculum compared with mineral nitrogen fertilizer on nodulation and seed yield of common bean. A meta-analysis. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 42, n. 3, 2022a. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00784-6>

SOUSA, W. S. *et al.* Supplementary reinoculation in topdressing of *Rhizobium tropici* in common bean crop: effects on nodulation, morphology, and grain yield. **Journal of Plant Nutrition**, v. 45, n. 20, p. 3094–3108, 2022b. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.2020833>

SOUZA, E. F. C.; SORATTO, R. P.; PAGANI, F. A. Aplicação de nitrogênio e inoculação com rizóbio em feijoeiro cultivado após milho consorciado com braquiária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 4, p. 370–377, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011000400005>

SOUZA, J. E. B.; FERREIRA, E. P. B. Improving sustainability of common bean production systems by co-inoculating rhizobia and azospirilla. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 237 p. 250–57, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.040>

SOUZA, S. S. *et al.* Cultivares de feijoeiro irrigado em função de doses de nitrogênio em cobertura. **Nucleus**, v. 16, n. 1, p. 85–95, 2019.

TAIZ, L. *et al.* **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant Physiology**. Sinauer Associates. Inc., Sunderland, MA, 2006.

TARSITANO, M. A. A.; SANT'ANA, A. L.; TARSITANO, R. A. Aspectos sociais e econômicos da produção de feijão. In: ARF, O. *et al.* (eds.). **Aspectos gerais da cultura do feijão *Phaseolus vulgaris* L.** Botucatu: FEPAF, p. 15–27, 2015.

TEIXEIRA, C. M. *et al.* A. Produtividade e teores foliares de nutrientes do feijoeiro sob diferentes palhadas e doses de nitrogênio em semeadura direta. **Acta Scientiarum: Agronomy**, v. 30, n. 1, p. 123–130, 2008. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v30i1.1160>

TEIXEIRA, I. R. *et al.* Response of common bean to *Rhizobium* reinoculation in topdressing. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, n. 4, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n4p274-282>

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. e155, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/leg3.155>

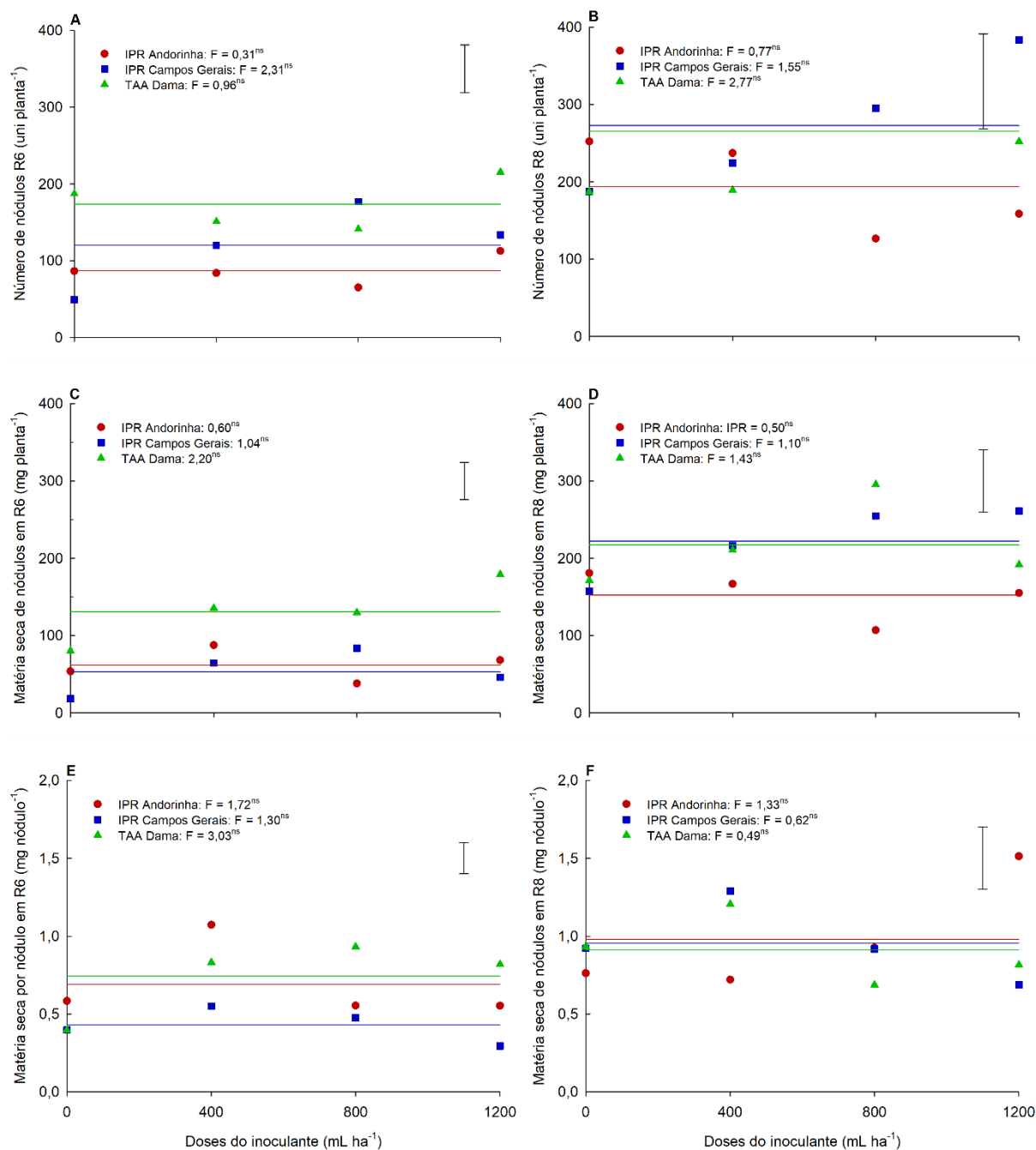
VARGAS, M. A. T.; MENDES, I. C.; HUNGRIA, M. Response of field-grown bean (*Phaseolus vulgaris* L.) to Rhizobium inoculation and nitrogen fertilization in two Cerrados soils. **Biology and Fertility of Soils**, v. 32, p. 228–233, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1007/s003740000240>

WANDER, A. E. Produção e consumo de feijão no Brasil, 1975-2005. **Informações Econômicas**, v. 37, n. 2, p. 7-21, 2007.

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. 952, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00952>

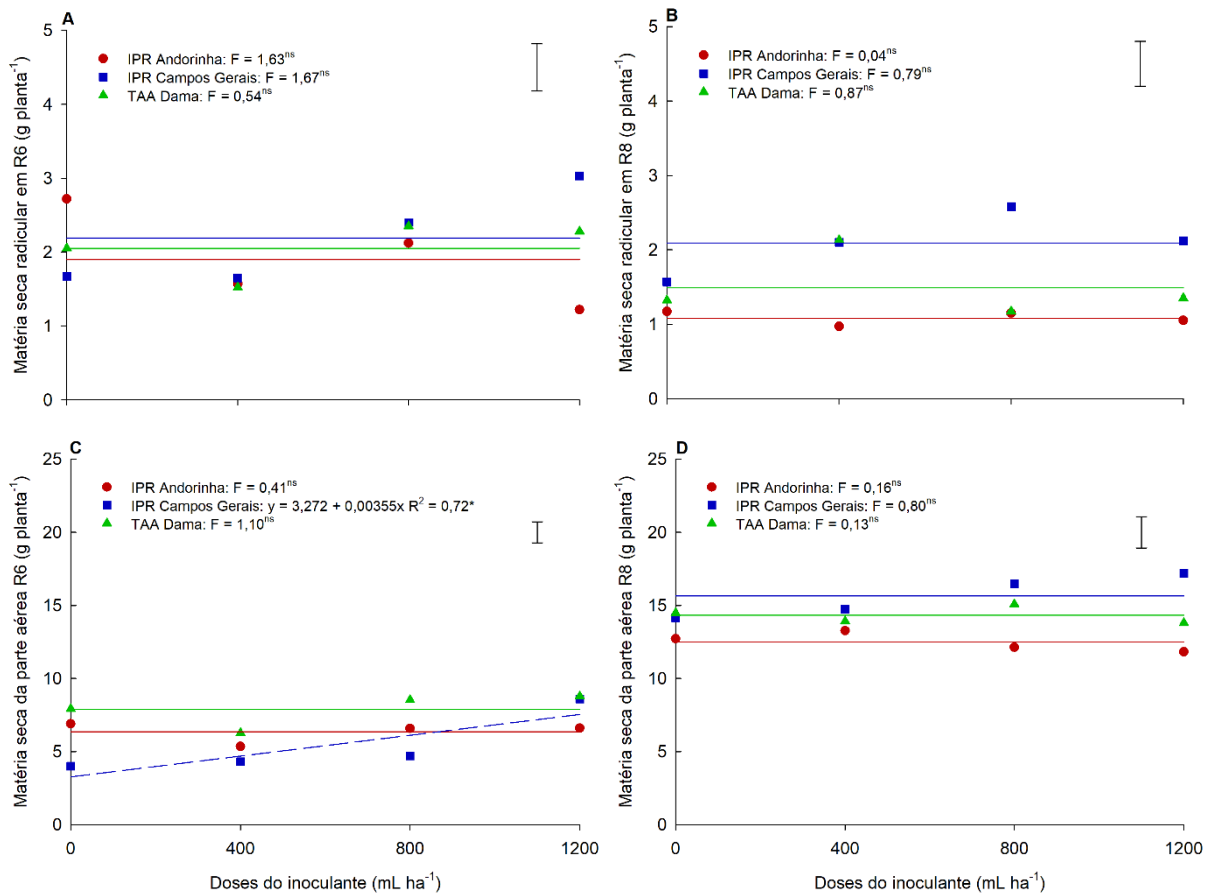
YADEGARI, M. *et al.* Evaluation of bean (*Phaseolus vulgaris*) seeds inoculation with *Rhizobium phaseoli* and plant growth promoting *Rhizobacteria* (PGPR) on yield and yield components. **African Journal of Agricultural Research**, v. 5, n. 9, p. 792–799, 2010. DOI: <https://doi.org/10.3923/pjbs.2008.1935.1939>

APÊNDICE A – ANÁLISE DE REGRESSÃO POLINOMIAL PARA O NÚMERO DE NÓDULOS (NN), MATÉRIA SECA DE NÓDULOS (MSN) E MATÉRIA SECA POR NÓDULO (MSPN) DE CULTIVARES DE FEIJÃO-COMUM NOS ESTÁDIOS FENOLÓGICOS R6 E R8 SUBMETIDAS A DIFERENTES FORMAS PARA FORNECIMENTO DE N EM CONDIÇÕES DE CASA DE VEGETAÇÃO



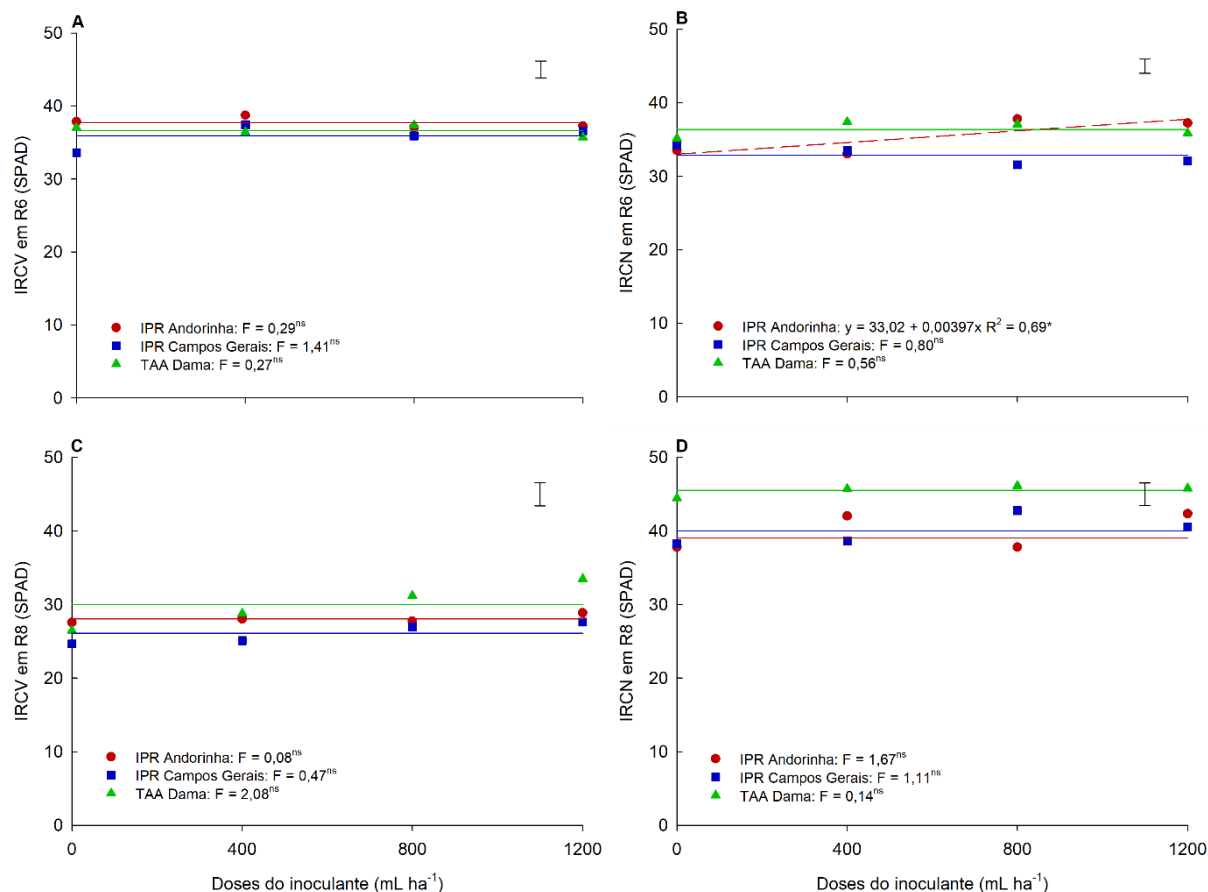
A barra vertical indica diferença significativa de acordo com o teste Tukey ($p \leq 0,05$) para as cultivares nas doses do inoculante líquido (400, 800 e 1200 mL ha⁻¹) pulverizados em pós-emergência.

APÊNDICE B – ANÁLISE DE REGRESSÃO POLINOMIAL PARA A MATÉRIA SECA RADICULAR (MSR) E MATÉRIA SECA DA PARTE AÉREA (MSPA) DE CULTIVARES DE FEIJÃO-COMUM NOS ESTÁDIOS FENOLOGICOS R6 E R8 SUBMETIDAS A DIFERENTES FORMAS PARA FORNECIMENTO DE N EM CONDIÇÕES DE CASA DE VEGETAÇÃO



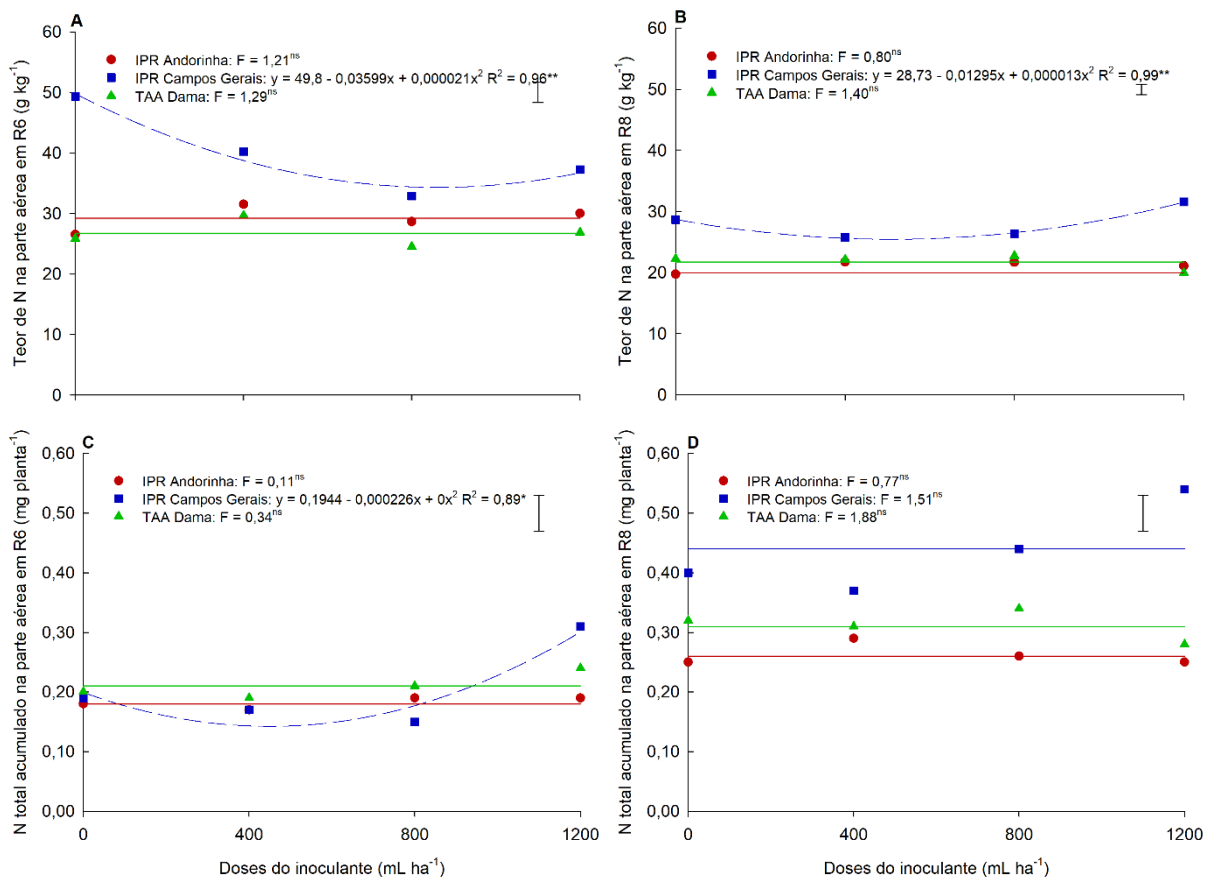
A barra vertical indica diferença significativa de acordo com o teste Tukey ($p \leq 0,05$) para as cultivares nas doses do inoculante líquido (400, 800 e 1200 mL ha⁻¹) pulverizados em pós-emergência.

APÊNDICE C – ANÁLISE DE REGRESSÃO POLINOMIAL PARA PARA O ÍNDICE RELATIVO DE CLOROFILA NO TRIFÓLIO NOVO DO ÁPICE DO CAULE DA PLANTA (IRCN) E NO TRIFÓLIO VELHO DA PARTE BASAL DO COLO DA PLANTA (IRCV) DE CULTIVARES DE FEIJÃO-COMUM NOS ESTÁDIOS FENOLÓGICOS R6 E R8 SUBMETIDAS A DIFERENTES FORMAS PARA FORNECIMENTO DE N EM CONDIÇÕES DE CASA DE VEGETAÇÃO



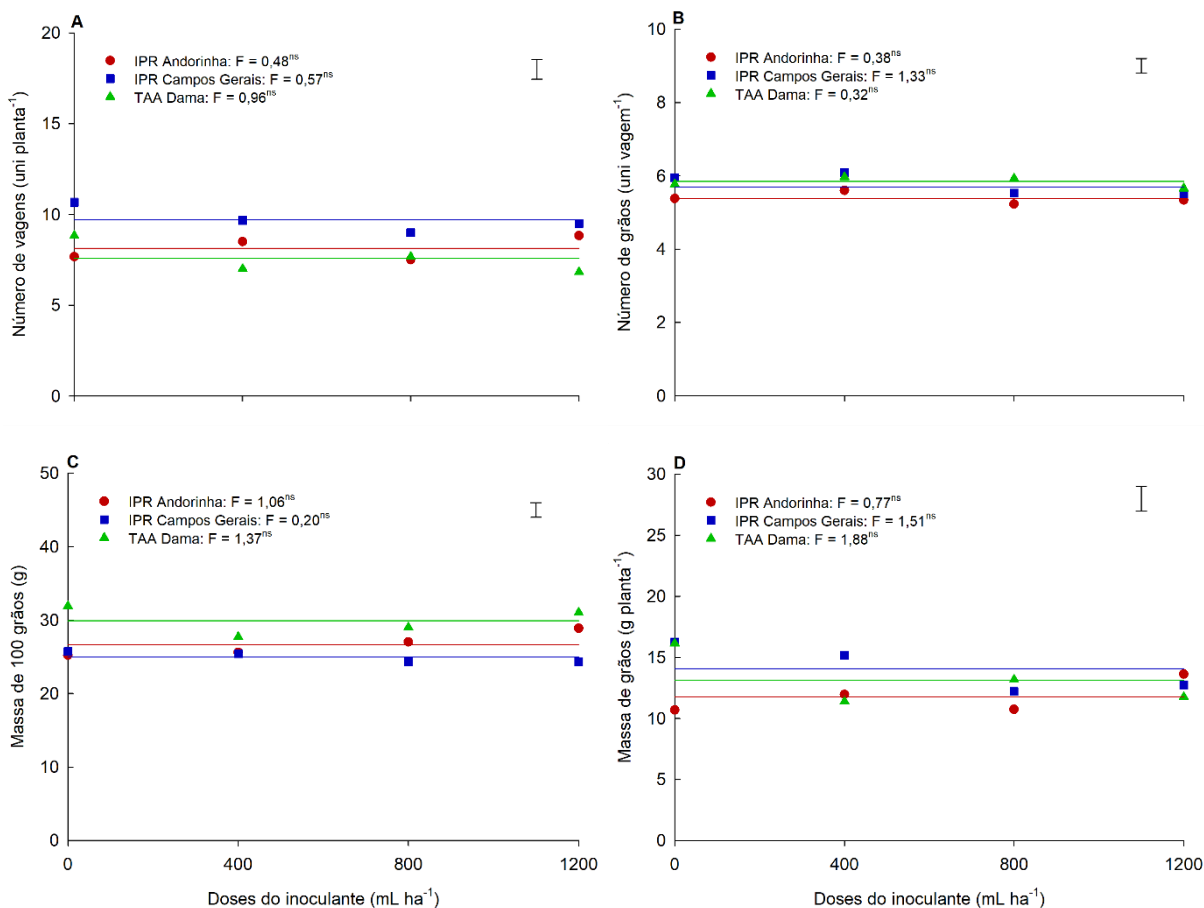
A barra vertical indica diferença significativa de acordo com o teste Tukey ($p \leq 0,05$) para as cultivares nas doses do inoculante líquido (400, 800 e 1200 mL ha⁻¹) pulverizados em pós-emergência.

APÊNDICE D – ANÁLISE DE REGRESSÃO POLINOMIAL PARA O TEOR DE N NA PARTE AÉREA (TN) E A QUANTIDADE DE N TOTAL ACUMULADO NA PARTE AÉREA (NAPA) DE FEIJÃO-COMUM NOS ESTÁDIOS FENOLÓGICOS R6 E R8 SUBMETIDAS A DIFERENTES FORMAS PARA FORNECIMENTO DE N EM CONDIÇÕES DE CASA DE VEGETAÇÃO



A barra vertical indica diferença significativa de acordo com o teste Tukey ($p \leq 0,05$) para as cultivares nas doses do inoculante líquido (400, 800 e 1200 mL ha⁻¹) pulverizados em pós-emergência.

APÊNDICE E – ANÁLISE DE REGRESSÃO POLINOMIAL PARA O NÚMERO DE VAGENS POR PLANTA (NVP), NÚMERO DE GRÃOS POR VAGEM (NGV), MASSA DE 100 GRÃOS (M100G) E MASSA DE GRÃOS POR PLANTA (MGP) DE FEIJÃO-COMUM NOS ESTÁDIOS FENOLÓGICOS R6 E R8 SUBMETIDAS A DIFERENTES FORMAS PARA FORNECIMENTO DE N EM CONDIÇÕES DE CASA DE VEGETAÇÃO



A barra vertical indica diferença significativa de acordo com o teste Tukey ($p \leq 0,05$) para as cultivares nas doses do inoculante líquido (400, 800 e 1200 mL ha⁻¹) pulverizados em pós-emergência.

APÊNDICE F – TESTE DE MÉDIAS E RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA OS TEORES FOLIARES DE MACRONUTRIENTES (FÓSFORO, POTÁSSIO, CÁLCIO, MAGNÉSIO E ENXOFRE) DE FEIJÃO-COMUM (CV. TAA DAMA) NO ESTÁDIO FENOLÓGICO R6 SUBMETIDO A DIFERENTES FORMAS PARA FORNECIMENTO DE N EM QUATRO EXPERIMENTOS DE CAMPO

Tratamento	P	K	Ca	Mg	S
	----- g kg ⁻¹ -----				
Experimentos (E)					
São Manuel I	2,34 ab ⁽¹⁾	26,17 c	17,45 a	6,54 a	0,95 a
São Manuel II	2,49 a	42,21 ab	13,57 b	4,38 b	0,66 b
Botucatu I	2,61 a	39,05 b	10,83 c	2,19 d	0,87 a
Botucatu II	1,82 b	44,01 a	8,75 d	3,75 c	0,86 a
Fornecimento de N (FN)					
Controle	3,03 a	34,27 c	10,19 b	3,89 c	0,84 a
Inoculação na semente	2,73 a	34,58 c	11,09 b	3,86 c	0,91 a
Inoculação + reinoculação	2,30 ab	37,66 bc	11,89 b	3,94 bc	0,76 a
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	1,80 b	39,15 b	14,58 a	4,60 ab	0,83 a
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	1,71 b	43,65 a	15,50 a	4,78 a	0,84 a
Fonte de Variação	$P > F$				
E	0,011	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
FN	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,346
E × FN	0,004	<0,001	0,013	0,545	0,421
CV (%)	33,6	11,0	19,1	16,3	22,7

⁽¹⁾Médias seguidas da mesma letra, na coluna e dentro de cada, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Controle: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral 60 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

**APÊNDICE G – TESTE DE MÉDIAS E RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA
PARA O TEOR FOLIAR DE MICRONUTRIENTES (COBRE, FERRO,
MANGANÊS E ZINCO) DE FEIJÃO-COMUM (CV. TAA DAMA) NO
ESTÁDIO FENOLÓGICO R6 SUBMETIDO A DIFERENTES FORMAS
PARA FORNECIMENTO DE N EM QUATRO EXPERIMENTOS DE
CAMPO**

Tratamento	Cu	Fe	Mn	Zn
	----- mg kg ⁻¹ -----			
Experimentos (E)				
São Manuel I	11,29 a ⁽¹⁾	1406,15 a	89,46 b	35,51 a
São Manuel II	3,85 c	695,89 b	142,87 a	30,11 b
Botucatu I	6,88 b	182,54 c	99,61 b	29,07 b
Botucatu II	4,37 c	188,24 c	76,59 b	23,92 c
Fornecimento de N (FN)				
Controle	8,03 a	1122,65 a	101,33 ab	31,70 a
Inoculação na semente	6,83 ab	931,57 ab	99,30 ab	30,26 a
Inoculação + reinoculação	6,30 b	691,06 b	85,56 b	28,85 a
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	6,06 b	162,84 c	105,72 ab	28,35 a
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	5,78 b	182,90 c	118,77 a	29,12 a
Fonte de Variação	----- P > F -----			
E	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
FN	<0,001	<0,001	0,025	0,434
E × FN	<0,001	<0,001	<0,001	0,028
CV (%)	20,2	66,9	27,0	18,4

⁽¹⁾Médias seguidas da mesma letra, na coluna e dentro de cada fator, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Controle: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral 60 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

**APÊNDICE H – TESTE DE MÉDIAS E RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA
PARA OS TEORES FOLIARES DE MACRONUTRIENTES (FÓSFORO,
POTÁSSIO, CÁLCIO, MAGNÉSIO E ENXOFRE) DE CULTIVARES DE
FEIJÃO-COMUM NO ESTÁDIO FENOLÓGICO R6 SUBMETIDAS A
DIFERENTES FORMAS PARA FORNECIMENTO DE N EM DOIS
EXPERIMENTOS DE CAMPO CONDUZIDOS EM BOTUCATU**

Tratamento	P	K	Ca	Mg	S
----- g kg ⁻¹ -----					
Cultivar (C)	Botucatu I				
IPR Andorinha	1,99 b ⁽¹⁾	65,83 a	11,06 a	3,64 a	0,83 b
IPR Campos Gerais	2,81 a	33,90 b	10,18 b	2,24 b	1,10 a
TAA Dama	2,61 ab	39,05 b	10,83 ab	2,19 b	0,87 b
Fornecimento de N (FN)					
Controle	2,54 a	49,77 a	10,70 ab	2,79 b	1,03 a
Inoculação na semente	2,69 a	47,40 a	10,01 b	2,40 bc	1,01 a
Inoculação + reinoculação	2,31 a	44,98 a	10,29 ab	2,10 c	0,86 a
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	2,34 a	42,31 a	11,01 ab	2,66 bc	0,84 a
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	2,47 a	46,85 a	11,46 a	3,50 a	0,95 a
Fonte de Variação	$P > F$				
C	0,011	<0,001	0,035	<0,001	<0,001
FN	0,808	0,163	0,016	<0,001	0,026
C × FN	0,005	0,133	<0,001	<0,001	0,447
CV (%)	34,6	15,9	10,0	20,0	18,0
Cultivar (C)	Botucatu II				
IPR Andorinha	1,87 a ⁽¹⁾	32,60 b	10,77 a	2,52 b	1,05 a
IPR Campos Gerais	1,97 a	20,67 c	5,91 c	1,43 c	1,18 a
TAA Dama	1,82 a	44,01 a	8,75 b	3,75 a	0,86 b
Fornecimento de N (FN)					
Controle	1,92 a	34,85 ab	7,26 a	2,79 a	1,01 a
Inoculação na semente	1,82 a	31,85 abc	9,63 a	2,83 a	1,06 a
Inoculação + reinoculação	1,82 a	29,03 c	7,94 a	2,19 a	0,99 a
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	1,86 a	29,92 bc	8,01 a	2,44 a	0,99 a
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	2,02 a	36,49 a	9,54 a	2,57 a	1,09 a
Fonte de Variação	$P > F$				
C	0,806	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
FN	0,960	<0,001	0,047	0,102	0,584
C × FN	0,971	<0,001	0,025	<0,001	0,208
CV (%)	40,7	13,6	26,4	24,6	16,4

⁽¹⁾Médias seguidas da mesma letra, na coluna e dentro de cada fator e experimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Controle: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral 60 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

APÊNDICE I – TESTE DE MÉDIAS E RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O TEOR FOLIAR DE MICRONUTRIENTES (COBRE, FERRO, MANGANÊS E ZINCO) DE CULTIVARES DE FEIJÃO-COMUM NO ESTÁDIO FENOLÓGICO R6 SUBMETIDAS A DIFERENTES FORMAS PARA FORNECIMENTO DE N EM DOIS EXPERIMENTOS DE CAMPO CONDUZIDOS EM BOTUCATU

Tratamento	Cu	Fe	Mn	Zn
----- mg kg ⁻¹ -----				
Cultivar (C)	Botucatu I			
IPR Andorinha	3,64 b ⁽¹⁾	172,78 a	104,14 a	20,99 b
IPR Campos Gerais	6,75 a	208,41 a	96,21 a	22,84 b
TAA Dama	6,88 a	182,54 a	99,61 a	29,07 a
Fornecimento de N (FN)				
Controle	5,60 a	232,92 a	90,30 a	25,14 a
Inoculação na semente	5,32 a	211,32 a	99,14 a	22,43 a
Inoculação + reinoculação	5,41 a	160,85 a	101,85 a	23,81 a
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	5,55 a	147,20 a	108,33 a	23,02 a
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	6,89 a	187,24 a	100,32 a	27,09 a
Fonte de Variação	$P > F$			
C	<0,001	0,566	0,334	<0,001
FN	0,049	0,298	0,148	0,106
C × FN	0,007	0,016	0,233	0,013
CV (%)	23,9	57,6	16,7	18,6
Cultivar (C)	Botucatu II			
IPR Andorinha	6,86 a ⁽¹⁾	326,92 a	96,98 a	27,15 ab
IPR Campos Gerais	7,00 a	345,70 a	96,84 a	29,82 a
TAA Dama	4,37 b	188,24 b	76,59 b	23,92 b
Fornecimento de N (FN)				
Controle	6,07 a	244,67 a	85,77 a	26,21 a
Inoculação na semente	7,00 a	281,98 a	100,93 a	26,34 a
Inoculação + reinoculação	5,88 a	309,70 a	83,08 a	26,43 a
N-mineral 60 kg ha ⁻¹	5,42 a	318,88 a	91,03 a	26,54 a
N-mineral 120 kg ha ⁻¹	6,02 a	279,53 a	89,87 a	29,27 a
Fonte de Variação	$P > F$			
C	<0,001	<0,001	0,016	<0,001
FN	0,231	0,531	0,458	0,400
C × FN	0,046	0,030	0,620	0,063
CV (%)	27,2	39,3	27,2	16,3

⁽¹⁾Médias seguidas da mesma letra, na coluna e dentro de cada fator e experimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Controle: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; Inoculação na semente: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; Inoculação + reinoculação: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; N-mineral 60 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; N-mineral 120 kg ha⁻¹: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

APÊNDICE J – INSTALAÇÃO (“A” E “B”) E CONDUÇÃO (“C” E “D”) DO EXPERIMENTO EM CASA DE VEGETAÇÃO



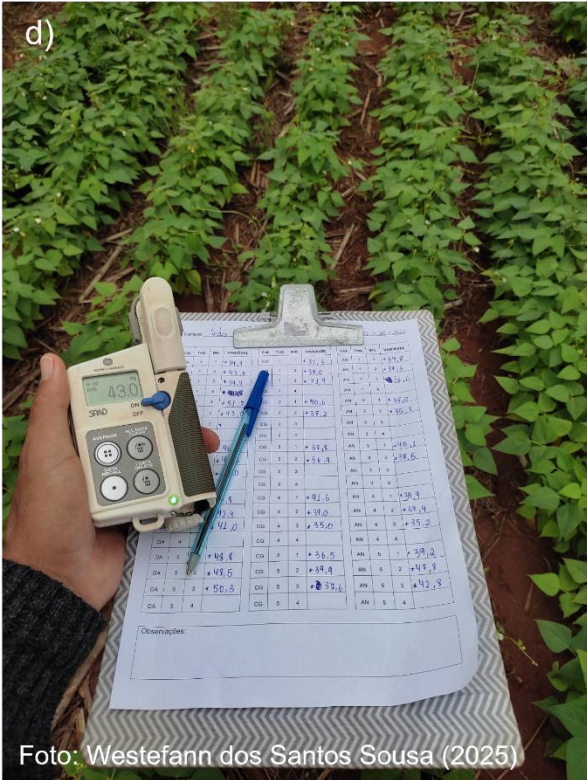
APÊNDICE K – INSTALAÇÃO DOS EXPERIMENTOS CONDUZIDOS EM SÃO MANUEL I (A), SÃO MANUEL II (B), BOTUCATU I (C) E BOTUCATU II (D)



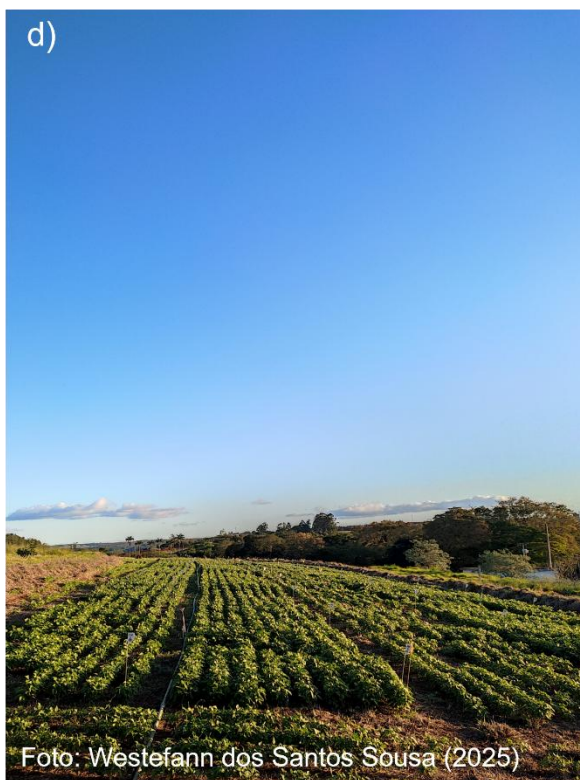
APÊNDICE L – PLANTAS DE FEIJÃO-COMUM COM 5 (A), 20 (B), 50 (C) E 55 DIAS APÓS A EMERGÊNCIA (D) NO EXPERIMENTO I CONDUZIDO EM SÃO MANUEL/SP



APÊNDICE M – PLANTAS DE FEIJÃO-COMUM COM 20 (A), 25 (B), 45 (C) E 50 DIAS APÓS A EMERGÊNCIA (D) NO EXPERIMENTO II CONDUZIDO EM SÃO MANUEL/SP



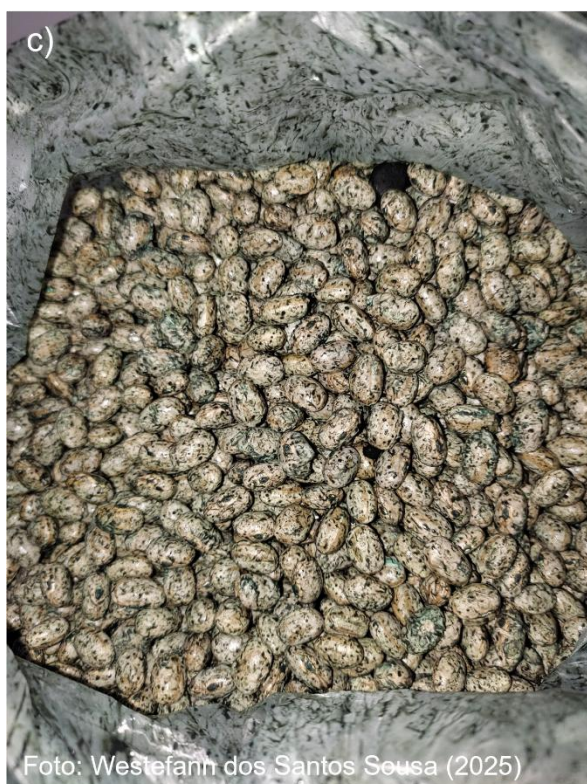
APÊNDICE N – PLANTAS DE FEIJÃO-COMUM COM 5 (A), 25 (B), 40 (C) E 50 DIAS APÓS A EMERGÊNCIA (D) NO EXPERIMENTO I CONDUZIDO EM BOTUCATU/SP



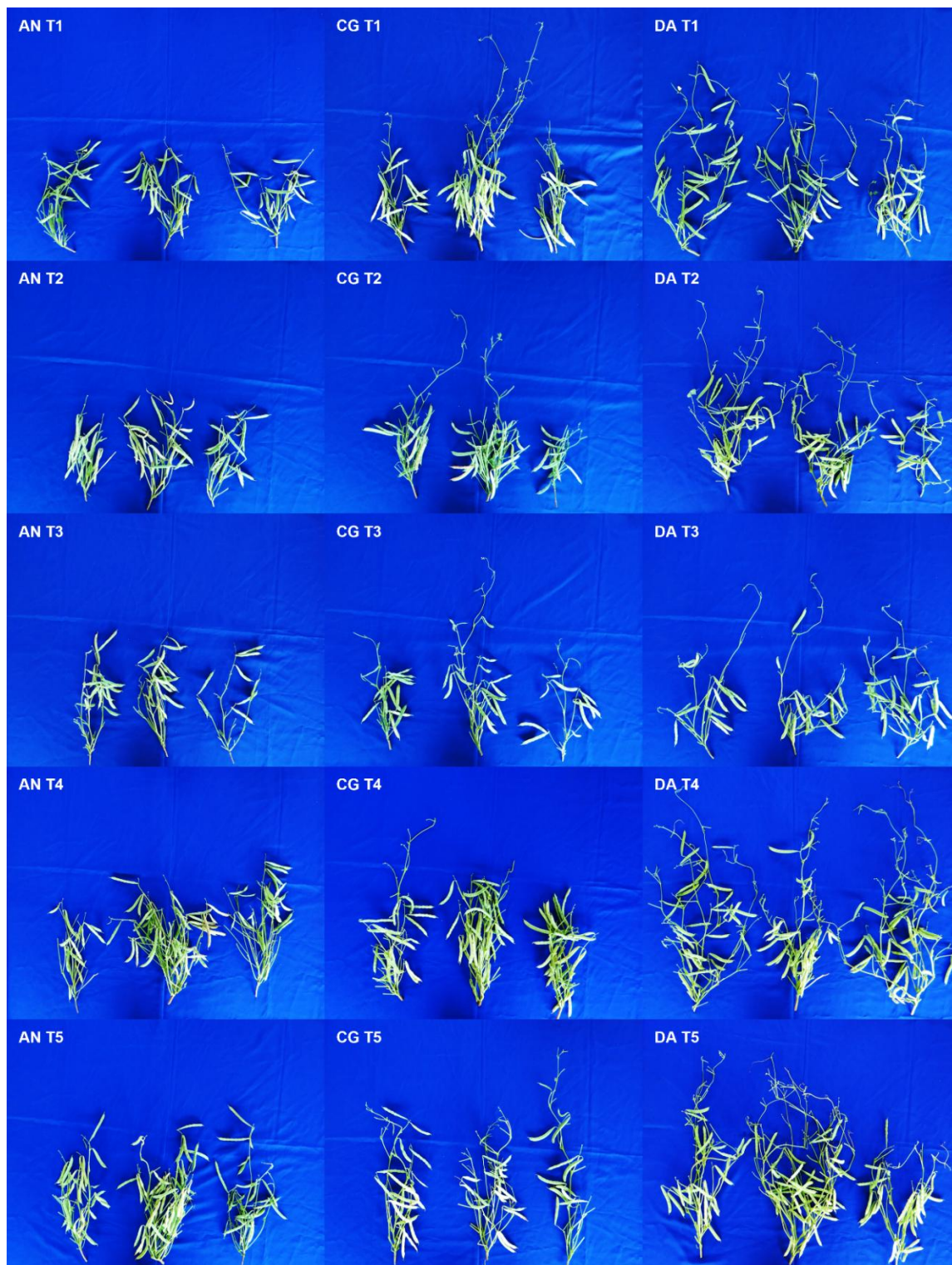
APÊNDICE O – PLANTAS DE FEIJÃO-COMUM COM 5 (A), 15 (B), 40 (C) E 60 DIAS APÓS A EMERGÊNCIA (D) NO EXPERIMENTO II CONDUZIDO EM BOTUCATU/SP



APÊNDICE P – INOCULANTE TURFOSO (A), SEMENTES DE FEIJÃO-COMUM TRATADAS COM INOCULANTE TURFOSO (“B” E “C”) E INOCULANTE LÍQUIDO UTILIZADO NA REINOCULAÇÃO EM TODOS OS EXPERIMENTOS CONDUZIDOS



APÊNDICE Q – PLANTAS DE FEIJÃO-COMUM CULTIVARES TAA DAMA (DA), TAA CAMPOS GERAIS (CG) E IPR ANDORINHA (AN) NO ESTÁDIO FENOLOGICO R8, SUBMETIDAS A DIFERENTES FORMAS PARA FORNECIMENTO DE N NO EXPERIMENTO II CONDUZIDO EM BOTUCATU



T1: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; T2: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; T3: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; T4: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; T5: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.

**APÊNDICE R – PLANTAS DE FEIJÃO-COMUM CULTIVARES TAA DAMA (DA),
TAA CAMPOS GERAIS (CG) E IPR ANDORINHA (AN) NO ESTÁDIO
FENOLÓGICO R8, SUBMETIDAS A DIFERENTES FORMAS PARA
FORNECIMENTO DE N NO EXPERIMENTO II CONDUZIDO EM BOTUCATU**



T1: ausência de inoculação, reinoculação e fertilização nitrogenada; T2: inoculação com *Rhizobium* exclusivamente na semente; T3: inoculação na semente + reinoculação em pós-emergência com pulverização de 1200 mL ha⁻¹ do inoculante líquido; T4: fertilização nitrogenada com 20 e 40 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente; T5: fertilização nitrogenada com 40 e 80 kg ha⁻¹ de N mineral na semeadura e cobertura, respectivamente.