

**INSTITUTO FEDERAL GOIANO DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
CENTRO DE EXCELÊNCIA EM BIOINSUMOS
COORDENAÇÃO DE CAPACITAÇÃO EM BIOINSUMOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *lato sensu* EM BIOINSUMOS
IF GOIANO CAMPUS RIO VERDE**

DANILO AUGUSTO SILVESTRE

**ECONOMIA DA FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO EM ESPÉCIES DE FEIJÃO
COMUM, CAUPI E MUNGO NO BRASIL**

RIO VERDE, GO

2025

DANILO AUGUSTO SILVESTRE

**ECONOMIA DA FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO EM ESPÉCIES DE FEIJÃO
COMUM, CAUPI E MUNGO NO BRASIL**

Monografia apresentada à Banca Examinadora do Curso de Bioinsumos do Instituto Federal Goiano como exigência parcial para obtenção do título de Especialista em Bioinsumos

Orientadora: Ma. Germana Gouveia Tavares

RIO VERDE, GO

2025

ERRATA

DANILO AUGUSTO SILVESTRE

ECONOMIA DA FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO EM ESPÉCIES DE FEIJÃO COMUM, CAUPI E MUNGO NO BRASIL

Foram adicionados, na página de Agradecimentos, os logotipos institucionais exigidos pelas normas vigentes.

Na contracapa, foram incluídas as informações referentes à cidade e ao ano de defesa da monografia.

O cabeçalho foi ajustado para conter exatamente seis linhas, em conformidade com o modelo encaminhado pela secretaria.

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

S587e Silvestre, Danilo Augusto
Economia da fixação biológica de nitrogênio em espécies de
feijão comum, caupi e mungo no Brasil / Danilo Augusto
Silvestre. Rio Verde 2026.
20f. il.
Orientadora: Prof^ª. Ma. Germana Gouveia Tavares.
Monografia (Especialista) - Instituto Federal Goiano, curso de
0230426 - Especialização em Bioinsumos - Rio Verde (Campus
Rio Verde).
I. Título.

Regulamento de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – CEBIO/IF Goiano

ANEXO V - ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos onze dias do mês de setembro de dois mil e vinte e cinco, às 16 horas e 35 minutos, reuniu-se a Banca Examinadora composta por: Profa. Germanna Gouveia Tavares (orientadora), Dra. Caroline Muller (membro externo) e Dra. Ketley Santos Sousa (membro externo), para examinar o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “ECONOMIA DA FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO EM ESPÉCIES DE FEIJÃO COMUM, CAUPI E MUNGO NO BRASIL” de DANILO AUGUSTO SILVESTRE, estudante do curso de Especialização em Bioinsumos do IF Goiano – Campus Rio Verde, sob Matrícula nº 2024102304260022. A palavra foi concedida ao(à) estudante para a apresentação oral do TC, em seguida houve arguição do candidato pelos membros da Banca Examinadora. Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela APROVAÇÃO do(a) estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que, após apresentação da versão corrigida do TC, foi assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Rio Verde, 11 de setembro de 2025.

(Assinado eletronicamente)

Germanna Gouveia Tavares

Orientador(a)

(Assinado eletronicamente)

Caroline Muller

Membro da Banca Examinadora

(Assinado eletronicamente)

Ketley Santos Sousa

Membro da Banca Examinadora

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força e sabedoria concedidas ao longo desta jornada.

À minha orientadora, pela dedicação, paciência, orientação e ensinamentos transmitidos, fundamentais para a construção deste trabalho.

Aos meus amigos, pela compreensão, parceria e palavras de encorajamento, que tornaram esta trajetória mais leve e significativa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Bioinsumos, pela oportunidade de crescimento pessoal e profissional.

Às instituições de apoio FAPEG, FUNAPE, IF Goiano e CEBIO, pelo suporte indispensável ao desenvolvimento desta pesquisa.



BIOGRAFIA DO ALUNO

Danilo Augusto Silvestre é natural de Londrina, Paraná. Graduado em Agronomia pela Universidade Estadual de Londrina (UEL), concluiu o Mestrado e o Doutorado em Agronomia (Ciências do Solo) na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), em cooperação com a Embrapa Agrobiologia. Realizou estágio de doutorado sanduíche na University of New Brunswick, Canadá, e estágios de pós-doutorado em Agronomia na Universidade Estadual de Londrina e no Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde.

RESUMO

A fixação biológica de nitrogênio (FBN) é um fator-chave para garantir a sustentabilidade da produção agrícola e a segurança alimentar. Este estudo teve como objetivo estimar a economia gerada pela FBN em feijão comum (*Phaseolus vulgaris*), feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) e feijão-mungo (*Vigna radiata*). Os dados de área, produção e produtividade das culturas deste estudo foram obtidos dos censos agropecuários brasileiros de 2006 e 2017. Estimamos a quantidade de N (ureia) necessária para produzir 1000 kg de grãos de cada espécie de feijão na ausência de inoculação. A contribuição da FBN para o suprimento de N de cada espécie de leguminosa foi obtida a partir de estudos utilizando o método da abundância natural de ^{15}N . Os benefícios econômicos gerados pela FBN foram de US\$ 6 milhões com feijão-mungo, US\$ 59 milhões com feijão-caupi e US\$ 119 milhões com feijão-comum, em 2017. A economia gerada pela FBN por hectare plantado com feijão-comum em 2017 aumentou 40% em comparação com 2006, principalmente devido ao aumento significativo de 64% na produtividade de grãos dessa cultura. Entre 2006 e 2017, a FBN manteve o feijão comum como principal espécie mitigadora de CO_2e , com valores estáveis em torno de 1,2 milhão tCO_2e . Em contraste, o caupi apresentou queda expressiva, de 1,22 milhão para 0,50 milhão tCO_2e , enquanto o mungo reduziu de 167 mil para apenas 46 mil tCO_2e , evidenciando forte retração na contribuição dessas espécies ao longo do período. Esse estudo destaca a importância da FBN na produção dessas espécies de leguminosas, o que permite a redução do uso de fertilizantes nitrogenados, aumento da economia e redução nas emissões de gases de efeito estufa nesses sistemas de produção, contribuindo para a sustentabilidade da produção agrícola.

Palavras-chave: Valoração econômica. Mitigação de gases de efeito estufa. *Bradyrhizobium*. *Rhizobium*

ABSTRACT

Biological nitrogen fixation (BNF) is a key factor in ensuring the sustainability of agricultural production and food security. This study aimed to estimate the economic savings generated by BNF in common bean (*Phaseolus vulgaris*), cowpea (*Vigna unguiculata*), and mung bean (*Vigna radiata*) production systems. Data on crop area, production, and productivity were obtained from the Brazilian Agricultural Censuses of 2006 and 2017. We estimated the amount of N (as urea) required to produce 1,000 kg of grain for each bean species in the absence of inoculation. The contribution of BNF to the N supply of each legume species was obtained from studies using the ^{15}N natural abundance method. The economic benefits generated by BNF reached US\$ 6 million for mung bean, US\$ 59 million for cowpea, and US\$ 119 million for common bean in 2017. The savings generated by BNF per hectare cultivated with common bean increased by 40% in 2017 compared with 2006, mainly due to the significant 64% increase in grain yield of this crop. Between 2006 and 2017, BNF maintained common bean as the main CO₂e-mitigating species, with stable values around 1.2 million tCO₂e. In contrast, cowpea showed a marked decline, from 1.22 million to 0.50 million tCO₂e, while mung bean decreased from 167 thousand to only 46 thousand tCO₂e, indicating a substantial reduction in the contribution of these species over the study period. This study highlights the importance of BNF in the production of these legume species, enabling reductions in nitrogen fertilizer use, increasing economic savings, and reducing greenhouse gas emissions in these production systems, thereby contributing to the sustainability of agricultural production.

Keywords: Economic valuation. Greenhouse gas mitigation. *Bradyrhizobium*. *Rhizobium*.

LISTA DE TABELAS/ ILUSTRAÇÕES

TABELA 1 - Variáveis utilizadas para estimar a economia gerada pela fixação biológica de nitrogênio (FBN) em espécies de feijões.

TABELA 2 - Variáveis utilizadas para estimar a mitigação de CO₂e gerada pela fixação biológica de nitrogênio (FBN) em espécies de feijões.

TABELA 3 - Economia gerada pela fixação biológica de nitrogênio em espécies de feijões cultivadas no Brasil, em 2006 e 2017 (US\$).

TABELA 4 - Contribuição da fixação biológica de nitrogênio (FBN) para a mitigação das emissões de CO₂ equivalente (tCO₂e) e (kg CO₂e ha⁻¹) resultantes da produção de espécies de feijões no Brasil, durante as safras de 2013-2014 a 2022-2023.

ANEXO 1 - Área e produção de grãos de feijões no Brasil em 2006 e 2017.

ANEXO 2 - Preço da tonelada de ureia em cada unidade da federação (em R\$) e preços médios pagos pela ureia no Brasil em 2006 e 2017.

SUMÁRIO

| | | |
|----|-----------------------------|----|
| 1. | INTRODUÇÃO GERAL..... | 1 |
| 2. | OBJETIVOS..... | 3 |
| 3. | MATERIAL E MÉTODOS..... | 4 |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 7 |
| 5. | CONCLUSÃO | 14 |
| 6. | REFERÊNCIAS..... | 14 |
| 7. | ANEXOS..... | 19 |

1. INTRODUÇÃO GERAL

O crescimento populacional representa um desafio global significativo (Tian; Bryksa; Yada, 2016), especialmente em relação à demanda crescente por alimentos e à sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Omomowo; Babalola, 2021). Nesse contexto, a agricultura moderna depende fortemente de fertilizantes químicos, cujos mercados apresentam elevada volatilidade econômica e forte dependência geopolítica. Conflitos internacionais e instabilidades no mercado global podem comprometer a oferta e aumentar os preços desses insumos agrícolas, incluindo fertilizantes nitrogenados (Silvestre et al., 2026; Telles; Nogueira; Hungria, 2023; Vos et al., 2025), impactando diretamente os custos de produção e a estabilidade da produção de alimentos.

Diante desse cenário, a agricultura sustentável torna-se fundamental para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas e garantir sistemas produtivos mais resilientes, integrando aspectos econômicos, sociais e ambientais (Araujo; Urbano; González-Andrés, 2020; Paudyal; Gupta, 2018; Soratto et al., 2022). Entre as estratégias sustentáveis disponíveis, destaca-se a fixação biológica de nitrogênio (FBN), processo realizado por bactérias diazotróficas capazes de converter o N_2 atmosférico em formas assimiláveis pelas plantas. A FBN reduz a dependência de fertilizantes nitrogenados sintéticos e representa uma alternativa economicamente viável e ambientalmente sustentável para os sistemas agrícolas (Silvestre et al., 2026; Telles; Nogueira; Hungria, 2023).

Além de reduzir o uso de insumos externos, a FBN contribui para o restabelecimento do acoplamento entre os ciclos do carbono e do N nos agroecossistemas (Dos Santos Sousa et al., 2022a; Kebede, 2020; Louarn et al., 2015). Em sistemas agrícolas de baixo uso de insumos, especialmente em pequenas propriedades rurais ou em sistemas orgânicos, a FBN pode representar a principal fonte de N disponível às culturas (Sant'Anna et al., 2018). Nesse sentido, a contribuição da FBN em leguminosas constitui um importante serviço ecossistêmico, promovendo maior eficiência no uso de nutrientes e reduzindo os impactos ambientais associados ao uso intensivo de fertilizantes nitrogenados (Kebede, 2020; Telles; Nogueira; Hungria, 2023).

Na década de 1990, estimou-se que a FBN contribuiu com aproximadamente 145 Tg de N por ano para os ecossistemas terrestres, sendo cerca de 35 Tg destinados à agricultura (Gruber; Galloway, 2008). Mais recentemente, (Herridge et al., 2022) estimaram que as leguminosas de grãos fixaram globalmente 35,5 Tg de N em 2018, dos quais 25,0 Tg foram provenientes da soja (*Glycine max*), 7,2 Tg das pulses e 3,3 Tg do amendoim (*Arachis hypogaea*). Esses resultados evidenciam a importância estratégica da FBN para a sustentabilidade da produção agrícola global.

Embora a soja represente o exemplo mais expressivo do sucesso da FBN em sistemas agrícolas tropicais, outras leguminosas alimentares também apresentam elevado potencial para

geração de benefícios econômicos e ambientais associados à simbiose com bactérias diazotróficas. Entre elas, destacam-se o feijão-comum, o feijão-caupi e o feijão-mungo, importantes fontes de proteínas e minerais para populações da África, Ásia e América Latina (Karavidas et al., 2022).

O Brasil é um dos principais produtores mundiais de feijão-comum (*Phaseolus vulgaris*) (FAO, 2024), cultura que vem passando por intensos avanços tecnológicos voltados ao aumento da produtividade e da eficiência do uso de N. O feijão-caupi (*Vigna unguiculata*), importante leguminosa originária da África, é amplamente cultivado por pequenos produtores das regiões Norte e Nordeste do Brasil, além de apresentar crescente expansão no Cerrado em sucessão à soja (Silva Júnior et al., 2018). Em contraste, o feijão-mungo (*Vigna radiata*), originário da Índia e amplamente cultivado na Ásia (Mohan Naik; Abhirami; Venkatachalapathy, 2020), ainda apresenta cultivo incipiente no Brasil, embora possua elevado potencial agrônomo e comercial.

Diversos estudos demonstram que o feijão-comum (De Oliveira et al., 2025; Dos Santos Sousa et al., 2022; Ferreira; Silva; Wander, 2020), o feijão-caupi (Galindo et al., 2020; Kyei-Boahen et al., 2017) e o feijão-mungo (Alene; Raffi; Tiruneh, 2020; Mahmood et al., 2021; Singh et al., 2021), quando inoculados com rizóbios eficientes, podem alcançar produtividades semelhantes às obtidas com fertilização nitrogenada mineral. Contudo, esses resultados dependem das condições edafoclimáticas, da eficiência simbiótica das cepas inoculadas e da adaptação genotípica das culturas (Pacheco et al., 2020).

Apesar da reconhecida importância agrônoma da FBN, estudos voltados à valoração econômica desse processo e à quantificação de seus benefícios ambientais ainda são escassos, especialmente em leguminosas alimentares (Döbereiner, 1997; Tauer, 1989; Telles; Nogueira; Hungria, 2023). Estimativas dessa natureza são fundamentais para subsidiar políticas públicas relacionadas à segurança alimentar, sustentabilidade agrícola e mitigação das mudanças climáticas.

No caso da soja, estimativas indicam que aproximadamente 68% do N utilizado pela cultura pode ser proveniente da FBN (Peoples et al., 2009), podendo alcançar valores próximos de 78% no Brasil (Peoples et al., 2021). Em termos econômicos, (Döbereiner, 1997) estimou que a FBN gerava aproximadamente US\$ 3,2 bilhões anuais para a produção de soja no início da década de 1990. Posteriormente, (Telles; Nogueira; Hungria, 2023) reportaram que esse benefício aumentou para US\$ 7,2 bilhões na safra 2009-2010 e para US\$ 15,2 bilhões na safra 2019-2020, evidenciando o crescimento da importância econômica da FBN nos sistemas agrícolas brasileiros. Em sistemas de produção de cana-de-açúcar, estimativas recentes indicaram que a FBN natural associada a bactérias diazotróficas contribuiu com benefícios econômicos acumulados de aproximadamente US\$ 15,7 bilhões ao longo de dez safras agrícolas, com economia média de US\$ 183 ha⁻¹ ano⁻¹ associada à redução da dependência de fertilizantes nitrogenados sintéticos (Silvestre et al., 2026).

Portanto, o objetivo deste estudo foi estimar os benefícios econômicos e ambientais associados à fixação biológica de nitrogênio em sistemas de produção de feijão-comum, feijão-caupi e feijão-mungo no Brasil. Para isso, foi desenvolvida uma estrutura analítica baseada na contribuição da FBN para o suprimento de N dessas culturas, visando quantificar a economia associada à redução do uso de ureia e a mitigação potencial das emissões de CO₂ equivalente.

2. OBJETIVOS

Estimar os benefícios econômicos e ambientais gerada pelos serviços ecossistêmicos da fixação biológica de N na produção de feijão no Brasil.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Dados utilizados para estimar a economia da FBN

As estimativas da economia gerada pela FBN foram realizadas para feijão-comum [*Phaseolus vulgaris* L.], feijão-caupi [*Vigna unguiculata* Walp.], e feijão-mungo [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] no Brasil. Para essas estimativas, foram utilizados os seguintes dados: área cultivada, produção, produtividade (Anexo 1), custo da ureia (Anexo 2), eficiência da aplicação de ureia, quantidade de N necessária para produzir 1000 kg de cada tipo de feijão, N disponível no solo e contribuição da FBN para o fornecimento de N dos feijões.

Os censos agrícolas mais recentes, de 2006 e 2017, foram utilizados para garantir informações precisas e abrangentes. Os dados de área, produção e produtividade das três culturas de feijões consideradas neste estudo foram obtidos nos censos agrícolas brasileiros de 2006 e 2017, fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2012; IBGE, 2019). Os dados sobre o custo da ureia foram obtidos junto à Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2023).

Para estimar a economia gerada pela FBN, considerou-se a quantidade de N (na forma de ureia) necessária para produzir 1000 kg de grãos de cada espécie de feijão sem inoculação. Além disso, foram utilizados dados de estudos de campo realizados no Brasil, com o método de abundância natural de ^{15}N , para determinar a contribuição da FBN para o fornecimento de N das diferentes espécies de leguminosas (Tabela 1).

Para determinar a quantidade de N necessária para produzir 1000 kg de grãos de cada espécie de feijão (na forma de ureia), conforme apresentado na Tabela 1, considerou-se o N acumulado na parte aérea da planta e nos grãos.

Tabela 1. Variáveis utilizadas para estimar a economia gerada pela fixação biológica de nitrogênio (FBN) em espécies de feijões.

| k | e_k^1 | d | s^2 | h | f_k^1 |
|--------------|---------|-----|---------------------|-----|---------|
| Cultura | kg | % | kg ha ⁻¹ | % | % |
| Feijão comum | 64 | 50 | 30 | 46 | 54 |
| Caupi | 122 | 50 | 30 | 46 | 55 |
| Mungo | 79 | 50 | 30 | 46 | 54 |

k : diferentes tipos de feijões; e_k : N necessário para produzir 1.000 kg de grãos; d : eficiência de aplicação da ureia, sendo necessária dobrar a dose de N; s : N disponível para a planta; h : concentração média de N na ureia; f_k : contribuição da FBN em cada espécie. ¹ Cálculo baseado em (Da Silva Júnior et al., 2018; Duscaron et al., 2011; Hungria et al., 2006; Leite et al., 2022; Moreira; Oliveira; Ferreira, 2017; Pacheco et al., 2020; Santos (2020).

Também foi considerada a quantidade de N fornecida à planta por outras fontes, ou seja, pela mineralização da matéria orgânica do solo e por fertilizantes como fosfato monoamônico (MAP) e fosfato diamônico (DAP). Assim, determinou-se que o N proveniente da mineralização da matéria orgânica do solo e dos fertilizantes pode fornecer aproximadamente 30 kg N ha⁻¹ (Hungria et al., 2006). Para essas estimativas, considerou-se uma eficiência de aplicação da ureia de 50% (Reetz Jr, 2016).

3.2 Avaliação econômica

As economias estimadas geradas pela FBN foram calculadas com base na quantidade equivalente de N na forma de ureia, que possui teor médio de N de 46%, aplicada como fonte de N. As economias geradas pela FBN foram estimadas utilizando a Eq. 1, adaptada da equação proposta por Telles et al., (2023):

$$Z_k = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^r \left\{ \left[\left((e_k \cdot m_{ijk}) - s \right) \cdot d \right] \left(\frac{p_{ij}}{h} \cdot a_{ijk} \cdot f_k \right) \right\} \quad (1)$$

onde Z_k representa a economia (em US\$) para diferentes culturas de feijões k ($k = 1, k = 2, k = 3$), i representa os anos (2006: $i = 1$; 2017: $i = 2$), e j representa as diferentes regiões ($j = 1 \dots 27$ Unidades Federativas do Brasil). Z é a economia total (em US\$) gerada pela FBN no cultivo de feijões, e e_k é a quantidade de N necessária para produzir uma determinada quantidade (em kg) de cada espécie (k). A variável m_{ijk} é a produtividade de grãos (kg ha⁻¹) da k -ésima espécie no i -ésimo ano e na j -ésima região, e d_{ij} é a eficiência de aplicação da ureia (em %), considerando perdas devido à volatilização de amônia, desnitrificação e lixiviação. Portanto, assumindo que a eficiência da ureia é de 50%, é necessário sobrar a dose de N. O N já disponível para a planta (em kg N ha⁻¹), proveniente do N

disponível no solo, da mineralização da matéria orgânica e de fontes secundárias (exceto fertilizantes nitrogenados), como fosfato diamônico (DAP) e fosfato monoamônico (MAP), é representado por s . O preço da ureia (em US\$ por kg) no i -ésimo ano e j -ésima região é representado por p_{ij} , e h representa a concentração média de N na ureia. A área cultivada com a k -ésima espécie no i -ésimo ano e j -ésima região (em ha) é representada por a_{ijk} , e f_k é a contribuição da FBN para a k -ésima espécie. A Tabela 1 contém as variáveis utilizadas para estimar a economia gerada pela FBN nas culturas de feijões.

Os valores monetários foram corrigidos para junho de 2023 com base no Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), que é o índice oficial de inflação do Brasil. Os valores corrigidos foram convertidos em dólares em 30 de junho de 2023 [US\$1 = R\$4,90] (BCB, 2023).

3.4 Estimativa de mitigação de CO₂ equivalente

A estimativa de mitigação de CO₂ equivalente proporcionada pela FBN foi baseada na quantidade equivalente de ureia necessária para a produção de cada espécie de feijão sem FBN. Assumiu-se que a 1 kg de N estão associadas emissões totais de 14.41 kg de CO₂ equivalente (CO₂-e), considerando tanto o processo de síntese industrial quanto a aplicação dos fertilizantes nitrogenados na agricultura (Menegat; Ledo; Tirado, 2022). Além disso, assume-se que 1% do N proveniente de fertilizantes é perdido na forma de N₂O, além das emissões indiretas desse gás resultantes da nitrificação e desnitrificação no solo, estimadas entre 0.25% e 0.4% adicionais de N₂O (Telles; Nogueira; Hungria, 2023). Nesse sentido, foi utilizada um modelo matemático para mitigação (Equação 2), adaptada de Telles et al. (2023). A Tabela 2 contém as variáveis utilizadas para estimar a mitigação de CO₂ gerada pela FBN para as espécies de feijões.

$$Y_k = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \{ [(m_{ijk} \cdot e) - s] \cdot d \cdot a_{ijk} \cdot c \cdot f_k \} \quad (\text{Equação 2})$$

onde: onde Y_k representa a mitigação de CO₂ (em kg) gerado pela FBN diferentes culturas de feijões k ($k = 1, k = 2, k = 3$), i representa os anos (2006: $i = 1$; 2017: $i = 2$), e j representa as diferentes regiões ($j = 1 \dots 27$ Unidades Federativas do Brasil). Z é a mitigação total de CO₂ (em kg) gerado pela FBN no cultivo dos feijões, e e_k é a quantidade de N necessária para produzir uma determinada quantidade (em kg) de cada espécie (k). e_k é o N necessário para produzir uma determinada quantidade (em kg) de cada espécie (k). A variável m_{ijk} corresponde à produtividade de grãos (kg ha⁻¹) da k -ésima espécie no i -ésimo ano e na j -ésima região. O d_{ij} representa a eficiência de aplicação da ureia (em %), uma vez que ocorrem perdas por volatilização de amônia, desnitrificação e lixiviação. Portanto, assumindo-se que a eficiência da aplicação de ureia é de 50%, é necessário dobrar a dose de N. O N

já disponível para a planta (em kg N ha^{-1}), proveniente do N disponível no solo, da mineralização da matéria orgânica e de fontes secundárias (exceto fertilizantes nitrogenados), como fosfato diamônico (DAP) e fosfato monoamônico (MAP), é representado por s . A área cultivada com a k -ésima espécie no i -ésimo ano e na j -ésima região (em ha) é representada por a_{ijk} , e f_k é a contribuição da FBN para a k -ésima espécie.

Tabela 2. Variáveis utilizadas para estimar a mitigação de CO_2 gerada pela fixação biológica de nitrogênio (FBN) em espécies de feijões.

| k | e_k ¹ | d | s ² | C ³ | f_k ¹ |
|--------------|--------------------|-----|---------------------|------------------|--------------------|
| Cultura | kg | % | kg ha^{-1} | | % |
| Feijão comum | 64 | 50 | 30 | 14,41 | 54 |
| Caupi | 122 | 50 | 30 | 14,41 | 55 |
| Mungo | 79 | 50 | 30 | 14,41 | 54 |

k : diferentes tipos de feijões; e_k : N necessário para produzir 1.000 kg de grãos; d : eficiência de aplicação da ureia, sendo necessária dobrar a dose de N; s : N disponível para a planta; C : 1 kg de N estão associadas emissões totais de 14.41 kg de CO_2 equivalente (CO_2 -e); f_k : contribuição da FBN em cada espécie. ¹Cálculo baseado em Silva Júnior et al. (2018), Pacheco et al. (2020), Leite et al. (2022), Santos (2020), Moreira et al., (2017) e Delić et al., (2011). ²Hungria et al., (2006). ³(Menegat; Ledo; Tirado, 2022).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Economia gerada pela fixação biológica de nitrogênio

Os resultados demonstram que a fixação biológica de nitrogênio (FBN) representa um importante serviço ecossistêmico e fonte de capital natural para os sistemas de produção de feijão no Brasil, gerando benefícios econômicos expressivos por meio da redução da dependência de fertilizantes nitrogenados sintéticos. Em 2017, as economias associadas à FBN foram estimadas em aproximadamente US\$ 119 milhões para o feijão-comum, US\$ 59 milhões para o feijão-caupi e US\$ 6 milhões para o feijão-mungo, evidenciando a relevância econômica desse processo para a agricultura brasileira (Tabela 3). A FBN tem sido reconhecida como uma prática agrícola sustentável capaz de reduzir os custos de produção e aumentar a sustentabilidade dos sistemas produtivos (Döbereiner, 1997; Gruber; Galloway, 2008; Kebede, 2020; Silvestre et al., 2026; Telles; Nogueira; Hungria, 2023).

As diferenças observadas entre espécies estiveram diretamente associadas à área cultivada e à produtividade das culturas (Anexo 1). Em 2006, o feijão-caupi apresentou maiores benefícios econômicos devido à maior área cultivada, enquanto em 2017 o feijão-comum passou a apresentar

maior contribuição econômica em decorrência do aumento de aproximadamente 64% da produtividade de grãos. Esse resultado está de acordo com (Mantovani; Plassa; Telles, 2024), que destacam mudanças espaciais e econômicas no cultivo de feijões no Brasil associadas à substituição de áreas e intensificação tecnológica. Adicionalmente, a redução de 57% e 77% nas áreas cultivadas com feijão-caupi e feijão-mungo, respectivamente, contribuiu diretamente para a redução dos benefícios econômicos gerados pela FBN nessas culturas.

Os resultados também evidenciam que os benefícios econômicos da FBN são influenciados pela dinâmica do mercado de fertilizantes (Anexo 2). Entre 2006 e 2017, o preço médio da ureia no Brasil reduziu aproximadamente 21%, diminuindo parcialmente o valor monetário estimado da FBN no período. Esse resultado reforça observações anteriores de que a volatilidade dos preços de fertilizantes e conflitos geopolíticos podem impactar significativamente os custos de produção agrícola e a valoração econômica da FBN (Silvestre et al., 2026; Telles; Nogueira; Hungria, 2023).

Do ponto de vista agrônomo, os resultados confirmam a elevada contribuição da FBN para o suprimento de N das leguminosas avaliadas, com participação média próxima de 54-55% do N acumulado nas plantas. Valores semelhantes já foram reportados em estudos utilizando abundância natural de ^{15}N para feijão-comum (Leite et al., 2022; Pacheco et al., 2020) (Pacheco et al., 2020; Leite et al., 2022), feijão-caupi (Da Silva Júnior et al., 2018)(Silva Júnior et al., 2018) e feijão-mungo (Favero et al., 2022a, 2022b). Entretanto, a literatura demonstra ampla variabilidade nesses valores em função do genótipo, eficiência simbiótica, manejo e condições edafoclimáticas (Belane; Dakora, 2009, 2010, 2011), indicando potencial para ampliar os benefícios da FBN mediante seleção de genótipos, uso de estirpes mais eficientes e adoção de boas práticas agrônomicas.

Em resumo, os resultados reforçam que a FBN constitui um importante serviço ecossistêmico capaz de gerar benefícios econômicos, agrônomicos e ambientais, reduzindo a dependência de fertilizantes nitrogenados sintéticos e aumentando a sustentabilidade dos sistemas de produção de leguminosas. A adoção de inoculantes e tecnologias voltadas ao aumento da eficiência simbiótica pode ampliar ainda mais esses benefícios, fortalecendo a agricultura de baixo carbono e a segurança alimentar (Araujo; Urbano; González-Andrés, 2020; Herridge et al., 2022; Silvestre et al., 2026; Telles; Nogueira; Hungria, 2023).

Tabela 3. Economia gerada pela fixação biológica de nitrogênio em espécies de feijões cultivadas no Brasil, em 2006 e 2017 (US\$).

| Estado | 2006 | | | | | | | 2017 | | | | | | |
|---------------------|-------------|-------------|------------|-------------|-----------------------|-------|-------|-------------|------------|-----------|-------------|-----------------------|-------|-------|
| | US\$ | | | | US\$ ha ⁻¹ | | | US\$ | | | | US\$ ha ⁻¹ | | |
| | F. comum | Caupi | Mungo | Total | F. comum | Caupi | Mungo | F. comum | Caupi | Mungo | Total | F. comum | Caupi | Mungo |
| Acre | 713,066 | 1,266,008 | 66,648 | 2,045,722 | 103 | 184 | 95 | 45,733 | 77,931 | 7,188 | 130,852 | 37 | 72 | 49 |
| Alagoas | 10,845,085 | 5,010,229 | 3,012,140 | 18,867,454 | 41 | 35 | 99 | 650,839 | 484,810 | 180,883 | 1,316,531 | 23 | 54 | 40 |
| Amapá | - | 9,964 | 4,694 | 14,658 | | 67 | 124 | 210 | 14,852 | 7,104 | 22,167 | 42 | 95 | 120 |
| Amazonas | 72,762 | 817,135 | 177,270 | 1,067,166 | 37 | 122 | 71 | 16,278 | 41,150 | 19,227 | 76,655 | 56 | 98 | 57 |
| Bahia | 21,987,598 | 41,970,943 | 10,194,787 | 74,153,329 | 91 | 115 | 63 | 3,875,645 | 7,485,402 | 750,839 | 12,111,886 | 43 | 62 | 26 |
| Ceará | 7,534,648 | 61,485,506 | 3,519,960 | 72,540,114 | 81 | 94 | 57 | 68,498 | 9,274,825 | 470,666 | 9,813,990 | 20 | 34 | 36 |
| Distrito Federal | 2,123,066 | 287,998 | 11,146 | 2,422,210 | 162 | 259 | 149 | 2,382,172 | 844,174 | 334,361 | 3,560,707 | 178 | 186 | 196 |
| Espírito Santo | 1,052,365 | 69,975 | 7,809 | 1,130,148 | 51 | 100 | 61 | 773,731 | 64,735 | 4,803 | 843,269 | 50 | 126 | 94 |
| Goiás | 7,841,640 | 1,432,966 | 477,366 | 9,751,972 | 149 | 259 | 203 | 16,735,487 | 2,705,217 | 16,057 | 19,456,761 | 179 | 217 | 99 |
| Maranhão | 1,974,455 | 3,403,942 | 2,802,979 | 8,181,376 | 32 | 133 | 65 | 63,779 | 2,232,570 | 301,067 | 2,597,416 | 25 | 88 | 38 |
| Mato Grosso | 1,470,938 | 1,243,743 | 283,851 | 2,998,531 | 122 | 227 | 187 | 7,694,685 | 19,359,396 | 921,514 | 27,975,595 | 111 | 149 | 117 |
| Mato Grosso do Sul | 1,017,747 | 256,466 | 17,978 | 1,292,191 | 88 | 186 | 74 | 921,533 | 61,929 | 10,439 | 993,902 | 99 | 111 | 85 |
| Minas Gerais | 20,671,463 | 6,851,858 | 1,165,898 | 28,689,218 | 95 | 156 | 105 | 31,948,378 | 1,341,616 | 294,715 | 33,584,710 | 135 | 93 | 54 |
| Pará | 1,345,842 | 5,134,908 | 1,517,990 | 7,998,740 | 54 | 141 | 62 | 237,203 | 1,031,373 | 164,643 | 1,433,219 | 88 | 106 | 57 |
| Paraíba | 2,156,796 | 14,583,777 | 2,429,176 | 19,169,749 | 41 | 73 | 64 | 270,928 | 1,532,385 | 655,102 | 2,458,416 | 16 | 27 | 56 |
| Paraná | 35,106,686 | 1,557,541 | 332,990 | 36,997,218 | 111 | 183 | 79 | 25,866,905 | 146,855 | 173,575 | 26,187,335 | 111 | 179 | 190 |
| Pernambuco | 7,025,370 | 16,797,267 | 3,087,727 | 26,910,364 | 51 | 70 | 63 | 868,980 | 1,881,959 | 455,077 | 3,206,016 | 22 | 30 | 37 |
| Piauí | - | 16,937,609 | 2,248,617 | 19,186,227 | | 74 | 44 | 22,840 | 5,343,943 | 39,541 | 5,406,324 | 16 | 36 | 21 |
| Rio de Janeiro | 516,152 | 263,060 | 100,773 | 879,985 | 110 | 281 | 222 | 99,301 | 131,790 | 5,544 | 236,636 | 85 | 249 | 105 |
| Rio Grande do Norte | 785,862 | 14,014,748 | 85,639 | 14,886,249 | 57 | 90 | 47 | 33,015 | 1,227,703 | 673,982 | 1,934,701 | 22 | 35 | 51 |
| Rio Grande do Sul | 8,100,961 | 46,879 | 39,231 | 8,187,071 | 43 | 137 | 70 | 4,130,836 | 95,775 | 15,126 | 4,241,737 | 82 | 228 | 113 |
| Rondônia | 1,197,328 | 2,711,296 | 809,847 | 4,718,471 | 17 | 122 | 126 | 173,951 | 30,521 | 11,260 | 215,731 | 66 | 86 | 68 |
| Roraima | 8,364 | 22,886 | 24,749 | 55,999 | 72 | 98 | 53 | 58,791 | 504,531 | 35,697 | 599,019 | 212 | 143 | 75 |
| Santa Catarina | 14,166,505 | 248,733 | 236,232 | 14,651,470 | 116 | 191 | 131 | 6,425,606 | 7,130 | 14,457 | 6,447,192 | 111 | 188 | 117 |
| São Paulo | 13,137,100 | 7,101,841 | 1,759,367 | 21,998,309 | 183 | 331 | 254 | 15,292,998 | 252,747 | 160,861 | 15,706,605 | 187 | 168 | 126 |
| Sergipe | 1,360,412 | 1,547,661 | 519,387 | 3,427,460 | 59 | 101 | 41 | 209,362 | 107,086 | 90,072 | 406,520 | 54 | 71 | 56 |
| Tocantins | 248,334 | 263,703 | 57,592 | 569,629 | 143 | 75 | 53 | 365,348 | 2,402,150 | 92,030 | 2,859,528 | 58 | 123 | 80 |
| Brazil=Σ | 162,460,544 | 205,338,643 | 34,991,844 | 402,791,031 | 80 | 94 | 68 | 119,233,031 | 58,684,555 | 5,905,832 | 183,823,418 | 112 | 63 | 50 |

Fonte: elaborado com base em dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) - IBGE (2012; 2019). Observações: F.comum = *Phaseolus vulgaris*; Caupi = *Vigna unguiculata*; Mungo = *Vigna radiata*.

4.2 Mitigação de CO₂e

A fixação biológica de nitrogênio contribuiu significativamente para a mitigação das emissões de CO₂ equivalente associadas à produção das espécies de feijões avaliadas. Em 2006, a mitigação total estimada foi de aproximadamente 2,60 milhões de tCO₂e, sendo 1,21 milhão tCO₂e provenientes do feijão-comum, 1,22 milhão tCO₂e do feijão-caupi e 167 mil tCO₂e do feijão-mungo (Tabela 4). Em 2017, a mitigação total reduziu para aproximadamente 1,80 milhão tCO₂e, refletindo principalmente a redução da área cultivada e da produção dessas leguminosas no Brasil.

O feijão-comum manteve-se como principal espécie mitigadora de CO₂e em 2017, com aproximadamente 1,23 milhão tCO₂e mitigados, resultado associado ao aumento da produtividade observado no período. Em contraste, o feijão-caupi e o feijão-mungo apresentaram forte retração em suas contribuições para mitigação climática, acompanhando a redução da área plantada dessas culturas.

A mitigação de CO₂e promovida pela FBN ocorre principalmente pela redução da necessidade de fertilizantes nitrogenados sintéticos, cuja produção industrial demanda elevadas quantidades de combustíveis fósseis e energia. Além disso, menores doses de fertilizantes nitrogenados reduzem as emissões diretas e indiretas de N₂O provenientes do solo agrícola (Menegat; Ledo; Tirado, 2022; Silvestre et al., 2026; Telles; Nogueira; Hungria, 2023). Assim, a utilização de inoculantes eficientes representa uma estratégia relevante para agricultura de baixo carbono.

Comparativamente, os valores estimados neste estudo, embora relevantes, são inferiores aos reportados para a cultura da soja no Brasil. Telles; Nogueira; Hungria, (2023) estimaram mitigação próxima de 183 milhões tCO₂e associada à substituição de fertilizantes nitrogenados pela FBN na safra 2019-2020. Entretanto, apesar da menor magnitude absoluta observada nos feijões, os resultados evidenciam a relevância dessas culturas para a sustentabilidade agrícola, especialmente considerando sua importância para a segurança alimentar e para pequenos produtores rurais. De maneira semelhante, estimativas recentes em sistemas de produção de cana-de-açúcar indicaram mitigação acumulada próxima de 192 milhões de tCO₂e ao longo de dez safras agrícolas, associada à substituição parcial de fertilizantes nitrogenados sintéticos pela FBN (Silvestre et al., 2026).

No contexto global, aproximadamente 22% das emissões líquidas antropogênicas de gases de efeito estufa estão associadas ao setor AFOLU (Agriculture, Forestry and Other Land Use), que inclui agricultura, florestas e mudanças no uso da terra (IPCC, 2022). Dessa forma, tecnologias biológicas que reduzam a dependência de fertilizantes nitrogenados sintéticos possuem elevado potencial estratégico para auxiliar no cumprimento das metas climáticas estabelecidas pelo Acordo de Paris

(ONU, 2015). Nesse sentido, os resultados deste estudo demonstram que a FBN em espécies de feijões representa não apenas um benefício agrônomo e econômico, mas também uma importante ferramenta para mitigação das mudanças climáticas e promoção da sustentabilidade agrícola.

Tabela 4. Contribuição da fixação biológica de nitrogênio (FBN) para a mitigação das emissões de CO₂ equivalente (tCO₂e) e (kg CO₂e ha⁻¹) resultantes da produção de espécies de feijões no Brasil durante as safras de 2013-2014 a 2022-2023.

| Estado | 2006 | | | | | | 2017 | | | | | |
|---------------------|--------------------|-------------|------------|---------------------------------------|-------|-------|--------------------|-------------|------------|---------------------------------------|-------|-------|
| | tCO ₂ e | | | Kg CO ₂ e ha ⁻¹ | | | tCO ₂ e | | | Kg CO ₂ e ha ⁻¹ | | |
| | F. comum | Caupi | Mungo | F. comum | Caupi | Mungo | F. comum | Caupi | Mungo | F. comum | Caupi | Mungo |
| Acre | 4.250,574 | 9.986,701 | 370,115 | 616 | 1450 | 526 | 77,939 | 594,951 | 32,946 | 64 | 553 | 223 |
| Alagoas | 113.702,563 | 52.540,010 | 17.367,462 | 434 | 367 | 571 | 9.247,042 | 2.583,681 | 472,035 | 323 | 286 | 105 |
| Amapá | - | 34,048 | 31,437 | - | 230 | 827 | 0,654 | 136,604 | 73,270 | 131 | 876 | 1242 |
| Amazonas | 762,950 | 5.365,944 | 687,705 | 387 | 799 | 274 | 94,746 | 383,341 | 114,667 | 324 | 908 | 338 |
| Bahia | 124.011,082 | 278.748,616 | 34.800,833 | 513 | 764 | 216 | 19.319,349 | 61.539,891 | 11.938,068 | 213 | 510 | 412 |
| Ceará | 38.166,553 | 354.503,050 | 9.012,807 | 411 | 543 | 145 | 991,039 | 6.190,513 | 615,587 | 295 | 23 | 46 |
| Distrito Federal | 20.800,242 | 3.124,200 | 106,372 | 1584 | 2810 | 1418 | 22.559,306 | 8.051,706 | 3.246,556 | 1683 | 1772 | 1899 |
| Espírito Santo | 1.746,457 | 427,597 | 25,072 | 84 | 612 | 196 | 1.451,107 | 484,628 | 30,285 | 93 | 943 | 594 |
| Goias | 74.860,958 | 15.540,954 | 4.955,927 | 1422 | 2813 | 2110 | 179.195,713 | 30.093,092 | 137,824 | 1913 | 2408 | 846 |
| Maranhão | 20.707,239 | 23.462,365 | 9.393,815 | 336 | 915 | 219 | 931,278 | 20.532,339 | 733,257 | 366 | 811 | 94 |
| Mato Grosso | 13.626,725 | 13.680,713 | 3.006,998 | 1129 | 2498 | 1978 | 94.623,349 | 257.933,876 | 11.537,871 | 1363 | 1988 | 1465 |
| Mato Grosso do Sul | 7.116,214 | 2.500,717 | 108,317 | 614 | 1815 | 448 | 8.444,655 | 596,156 | 87,650 | 904 | 1072 | 713 |
| Minas Gerais | 167.390,768 | 68.278,943 | 9.999,286 | 769 | 1557 | 903 | 309.169,433 | 10.784,545 | 1.341,949 | 1303 | 748 | 247 |
| Pará | 2.457,397 | 36.518,104 | 4.557,877 | 98 | 1005 | 187 | 2.103,157 | 9.999,255 | 983,709 | 777 | 1025 | 339 |
| Paraíba | 22.612,6239 | 58.452,465 | 7.712,192 | 430 | 295 | 203 | 3.851,606 | 21.767,100 | 3.831,966 | 229 | 389 | 327 |
| Paraná | 328.003,689 | 17.074,761 | 2.552,735 | 1035 | 2011 | 608 | 270.211,605 | 1.763,868 | 2.119,949 | 1154 | 2148 | 2322 |
| Pernambuco | 1.2720,254 | 69.801,749 | 10.648,379 | 93 | 293 | 216 | 12.734,105 | 27.568,566 | 851,270 | 323 | 436 | 68 |
| Piauí | - | 68.854,842 | 23.573,689 | - | 301 | 459 | 324,702 | 5.310,307 | 561,864 | 228 | 36 | 298 |
| Rio de Janeiro | 3423,380 | 2.411,635 | 882,722 | 732 | 2579 | 1949 | 861,245 | 1.618,451 | 53,941 | 734 | 3059 | 1018 |
| Rio Grande do Norte | 932,834 | 56.097,038 | 797,920 | 68 | 358 | 440 | 480,081 | 1.122,790 | 3.581,234 | 327 | 32 | 269 |

| | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|---------------|---------------|-------------|------|------|------|---------------|-------------|------------|------|------|------|
| Rio Grande do Sul | 1.7871,635 | 453,782 | 253,985 | 94 | 1323 | 452 | 43.291,570 | 1.349,269 | 182,100 | 859 | 3213 | 1359 |
| Rondônia | 12.572,750 | 17.839,635 | 5.484,315 | 177 | 803 | 853 | 1.237,492 | 263,887 | 82,327 | 469 | 741 | 496 |
| Roraima | 33,491 | 128,520 | 40,448 | 289 | 549 | 86 | 621,672 | 4.768,710 | 234,827 | 2244 | 1352 | 495 |
| Santa Catarina | 126.017,127 | 2.589,578 | 2.204,938 | 1035 | 1984 | 1220 | 73.949,850 | 94,092 | 169,557 | 1272 | 2476 | 1367 |
| São Paulo | 8.8965,617 | 55.968,550 | 13.163,732 | 1242 | 2609 | 1903 | 167.021,899 | 2.675,300 | 1.560,855 | 2041 | 1775 | 1218 |
| Sergipe | 3.972,031 | 9.376,881 | 5.598,966 | 174 | 611 | 443 | 1.146,138 | 807,165 | 524,622 | 293 | 538 | 325 |
| Tocantins | 1.792,959 | 1.092,419 | 95,229 | 1035 | 311 | 87 | 1.815,027 | 21.853,964 | 655,956 | 290 | 1117 | 569 |
| Brasil = Σ | 1.208.518,122 | 1.224.853,816 | 167.433,271 | 597 | 559 | 326 | 1.225.755,760 | 500.868,045 | 45.756,142 | 1150 | 539 | 386 |

5. CONCLUSÃO

A fixação biológica de nitrogênio (FBN) associada ao cultivo de feijão-comum, feijão-caupi e feijão-mungo gerou benefícios econômicos e ambientais relevantes para a agricultura brasileira. A substituição parcial de fertilizantes nitrogenados sintéticos pela FBN permitiu reduzir os custos associados ao uso de ureia e contribuiu significativamente para a mitigação das emissões de CO₂ equivalente nos sistemas produtivos avaliados.

Entre as espécies estudadas, o feijão-comum apresentou os maiores benefícios econômicos e ambientais em 2017, principalmente em função do aumento da produtividade de grãos, enquanto o feijão-caupi apresentou maior contribuição econômica em 2006 devido à maior área cultivada naquele período. Os resultados demonstram que a magnitude dos benefícios gerados pela FBN depende da interação entre eficiência simbiótica, produtividade agrícola e área cultivada.

Além da relevância econômica, a FBN constitui um importante serviço ecossistêmico ao reduzir a dependência de fertilizantes nitrogenados sintéticos, diminuindo a demanda energética associada à produção industrial desses insumos e contribuindo para sistemas agrícolas mais sustentáveis e de menor emissão de gases de efeito estufa.

Portanto, a utilização de inoculantes eficientes com bactérias diazotróficas em leguminosas representa uma estratégia promissora para fortalecer a sustentabilidade da produção agrícola, aumentar a eficiência do uso de N e contribuir para a mitigação das mudanças climáticas no Brasil.

6. REFERÊNCIAS

ALENE, Ayalew Addis; RAFFI, Mokula Mohammed; TIRUNEH, Kehali Jembere. Phosphorus use efficiency, yield and nodulation of mung bean (*Vigna radiata* L.) as influenced by the rate of phosphorus and Rhizobium strains inoculation in Metema district, Ethiopia. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 9, p. 1300–1315, 18 nov. 2020.

ARAUJO, Juan; URBANO, Beatriz; GONZÁLEZ-ANDRÉS, Fernando. Comparative environmental life cycle and agronomic performance assessments of nitrogen fixing rhizobia and mineral nitrogen fertiliser applications for pulses in the Caribbean region. **Journal of Cleaner Production**, v. 267, p. 122065, 10 set. 2020.

BCB – BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Taxa de câmbio**. Brasília, 2023. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/>. Acesso em: 30 jun. 2023.

BELANE, Alphonsus K.; DAKORA, Felix D. Measurement of N₂ fixation in 30 cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) genotypes under field conditions in Ghana, using the ¹⁵N natural abundance technique. **Symbiosis**, v. 48, n. 1, p. 47–56, 1 fev. 2009.

BELANE, Alphonsus K.; DAKORA, Felix D. Symbiotic N₂ fixation in 30 field-grown cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) genotypes in the Upper West Region of Ghana measured using ¹⁵N natural abundance. **Biology and Fertility of Soils**, v. 46, n. 2, p. 191–198, 1 fev. 2010.

BELANE, Alphonsus K.; DAKORA, Felix D. Photosynthesis, symbiotic N and C accumulation in leaves of 30 nodulated cowpea genotypes grown in the field at Wa in the Guinea savanna of Ghana. **Field Crops Research**, v. 124, n. 3, p. 279–287, 20 dez. 2011.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Informações agropecuárias: preços de insumos**. Brasília, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/>. Acesso em: 21 abr. 2023.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Informações agropecuárias: safras: série histórica das safras: feijão total (1^a, 2^a e 3^a safras)**. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/>. Acesso em: 17 jan. 2024.

DA SILVA JÚNIOR, Elson B. *et al.* Rhizobium Inoculation of Cowpea in Brazilian Cerrado Increases Yields and Nitrogen Fixation. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 2, p. 722–727, 2018.

DE OLIVEIRA, Karen Sinéia *et al.* Co-inoculation with *Rhizobium*, *Azospirillum*, and microalgae increases common bean yield and profitability. **Agronomy Journal**, v. 117, n. 1, p. e21719, 2025.

DÖBEREINER, Johanna. Biological nitrogen fixation in the tropics: Social and economic contributions. **Soil Biology and Biochemistry**, International Symposium - Sustainable Agriculture for the Tropics: The Role of Biological Nitrogen Fixation. v. 29, n. 5, p. 771–774, 1 maio 1997.

DOS SANTOS SOUSA, Westefann *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, p. 52, 2 jun. 2022.

DUSCARON *et al.* Effect of bradyrhizobial inoculation on growth and seed yield of mung bean in Fluvisol and Humofluvisol. **African Journal of Microbiology Research**, v. 5, n. 23, p. 3946–3957, 23 out. 2011.

FAVERO, Vinício Oliosi *et al.* *Bradyrhizobium* strains from Brazilian tropical soils promote increases in nodulation, growth and nitrogen fixation in mung bean. **Applied Soil Ecology**, v. 175, p. 104461, 1 jul. 2022.

FERREIRA, Enderson Petrônio de Brito; SILVA, Osmira Fátima da; WANDER, Alcido Elenor. Economics of rhizobia and azospirilla co-inoculation in irrigated common bean in commercial and family farming. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 55, p. e01532, 2020.

GALINDO, Fernando S. *et al.* Technical and economic viability of cowpea co-inoculated with *Azospirillum brasilense* and *Bradyrhizobium* spp. and nitrogen doses. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, p. 304–311, 2020.

GRUBER, Nicolas; GALLOWAY, James N. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. **Nature**, v. 451, n. 7176, p. 293–296, jan. 2008.

HERRIDGE, David F. *et al.* Quantifying country-to-global scale nitrogen fixation for grain legumes II. Coefficients, templates and estimates for soybean, groundnut and pulses. **Plant and Soil**, v. 474, n. 1, p. 1–15, 1 maio 2022.

HUNGRIA, Mariangela *et al.* Nitrogen nutrition of soybean in Brazil: Contributions of biological N₂ fixation and N fertilizer to grain yield. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 86, n. 4, p. 927–939, 10 out. 2006.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2006: segunda apuração: Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2017: resultados definitivos**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. **Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. DOI: 10.1017/9781009157926.

KARAVIDAS, Ioannis *et al.* Agronomic Practices to Increase the Yield and Quality of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.): A Systematic Review. **Agronomy**, v. 12, n. 2, 20 jan. 2022.

KEBEDE, Erana. Grain legumes production and productivity in Ethiopian smallholder agricultural system, contribution to livelihoods and the way forward. **Cogent Food & Agriculture**, v. 6, n. 1, p. 1722353, 1 jan. 2020.

REETZ JÚNIOR, H. F. Fertilizers and their efficient use. Paris: **International Fertilizer Industry Association**, 2016.

KYEI-BOAHEN, Stephen *et al.* Growth and Yield Responses of Cowpea to Inoculation and Phosphorus Fertilization in Different Environments. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, 3 maio 2017.

LEITE, Rafael de Almeida *et al.* Co-inoculation of *Rhizobium* and *Bradyrhizobium* promotes growth and yield of common beans. **Applied Soil Ecology**, v. 172, p. 104356, 1 abr. 2022.

LOUARN, Gaëtan *et al.* The amounts and dynamics of nitrogen transfer to grasses differ in alfalfa and white clover-based grass-legume mixtures as a result of rooting strategies and rhizodeposit quality. **Plant and Soil**, v. 389, n. 1, p. 289–305, 1 abr. 2015.

MAHMOOD, Abid *et al.* Evaluation of Symbiotic Association between Various Rhizobia, Capable of Producing Plant-Growth-Promoting Biomolecules, and Mung Bean for Sustainable Production. **Sustainability**, v. 13, n. 24, 13 dez. 2021.

MANTOVANI, Gabriela Gomes; PLASSA, Wander; TELLES, Tiago Santos. Spatial and economic dynamics of bean crops in an important production hub in Brazil. **Outlook on Agriculture**, v. 53, n. 2, p. 189–202, 1 jun. 2024.

MENEGAT, Stefano; LEDO, Alicia; TIRADO, Reyes. Greenhouse gas emissions from global production and use of nitrogen synthetic fertilisers in agriculture. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 14490, 25 ago. 2022.

- MOHAN NAIK, G.; ABHIRAMI, P.; VENKATACHALAPATHY, N. Mung Bean. *In*: MANICKAVASAGAN, A.; THIRUNATHAN, Praveena (Orgs.). **Pulses: Processing and Product Development**. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 213–228.
- MOREIRA, Leniany; OLIVEIRA, Ana; FERREIRA, Enderson. 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, p. 644–651, 20 jun. 2017.
- OMOMOWO, Olawale Israel; BABALOLA, Olubukola Oluranti. Constraints and Prospects of Improving Cowpea Productivity to Ensure Food, Nutritional Security and Environmental Sustainability. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, 22 out. 2021.
- ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Acordo de Paris sobre o clima. Brasília, 2025**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/88191-acordo-de-paris-sobre-o-clima>. Acesso em: 18 ago. 2025.
- PACHECO, Rafael Sanches *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, n. 1, p. 327–341, 1 set. 2020.
- PAUDYAL, Som Prasad; GUPTA, V. N. P. Substitution of chemical fertilizer nitrogen through *Rhizobium* inoculation technology. **Our Nature**, v. 16, n. 1, p. 43–47, 31 dez. 2018.
- PEOPLES, M. B. *et al.* The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems. **Symbiosis**, v. 48, n. 1, p. 1–17, 1 fev. 2009.
- PEOPLES, Mark B. *et al.* Quantifying country-to-global scale nitrogen fixation for grain legumes: I. Reliance on nitrogen fixation of soybean, groundnut and pulses. **Plant and Soil**, v. 469, n. 1, p. 1–14, 1 dez. 2021.
- SANT'ANNA, S. A. C. *et al.* Biological nitrogen fixation and soil N₂O emissions from legume residues in an Acrisol in SE Brazil. **Geoderma regional**, v. 15, p. e00196, 1 dez. 2018.
- SANTOS, D. M. T. Inoculação de feijão-mungo (*Vigna radiata* (L.) Wilczek) com estirpes comerciais de *Bradyrhizobium*: avaliação da produtividade no município de Campos dos Goytacazes-RJ. 2020. **Dissertação (Mestrado)** – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://rima.ufrj.br/jspui/handle/20.500.14407/10696>. Acesso em: 17 jan. 2024.
- SILVESTRE, Danilo Augusto *et al.* Economic and environmental contributions of biological nitrogen fixation in Brazilian sugarcane production. **Biomass and Bioenergy**, v. 211, p. 109174, 1 ago. 2026.
- SINGH, Guriqbal *et al.* Growth, symbiotic traits, productivity and nutrient uptake as influenced by dose and time of nitrogen application and *Rhizobium* inoculation in mungbean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek]. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 13, p. 1982–1992, 9 ago. 2021.
- SORATTO, Rogério P. *et al.* Turning biennial into biannual harvest: Long-term assessment of Arabica coffee–macadamia intercropping and irrigation synergism by biological and economic indices. **Food and Energy Security**, v. 11, n. 2, p. e365, 2022.

TAUER, Loren W. Economic impact of future biological nitrogen fixation technologies on United States agriculture. **Plant and Soil**, v. 119, n. 2, p. 261–270, 1 out. 1989.

TELLES, Tiago Santos; NOGUEIRA, Marco Antonio; HUNGRIA, Mariangela. Economic value of biological nitrogen fixation in soybean crops in Brazil. **Environmental Technology & Innovation**, v. 31, p. 103158, 1 ago. 2023.

TIAN, Jenny (Jingxin); BRYKSA, Brian C.; YADA, Rickey Y. Feeding the world into the future – food and nutrition security: the role of food science and technology†. **Frontiers in Life Science**, v. 9, n. 3, p. 155–166, 2 jul. 2016.

VOS, Rob *et al.* Global shocks to fertilizer markets: Impacts on prices, demand and farm profitability. **Food Policy**, v. 133, p. 102790, 1 maio 2025.

7 ANEXO

Anexo 1. Área e produção de grãos de feijões no Brasil em 2006 e 2017.

| Estados | 2006 | | | | | | 2017 | | | | | |
|---------------------|-----------|-----------|---------|--------------|-----------|---------|-----------|---------|---------|--------------|---------|--------|
| | Área (ha) | | | Produção (t) | | | Área (ha) | | | Produção (t) | | |
| | F. comum | Caupi | Mungo | F. comum | Caupi | Mungo | F. comum | Caupi | Mungo | F. comum | Caupi | Mungo |
| Acre | 6,898 | 6,888 | 703 | 7,501 | 6,858 | 568 | 1,224 | 1,075 | 148 | 652 | 572 | 83 |
| Alagoas | 261,800 | 142,978 | 30,399 | 114,157 | 27,169 | 25,670 | 28,614 | 9,040 | 4,490 | 9,284 | 3,559 | 2,089 |
| Amapá | - | 148 | 38 | - | 54 | 40 | 5 | 156 | 59 | 3 | 109 | 82 |
| Amazonas | 1,972 | 6,719 | 2,506 | 766 | 4,427 | 1,511 | 292 | 422 | 339 | 232 | 302 | 222 |
| Bahia | 241,767 | 364,630 | 160,763 | 237,835 | 233,807 | 89,355 | 90,546 | 120,703 | 28,971 | 61,840 | 61,504 | 9,710 |
| Ceará | 92,755 | 652,532 | 62,237 | 81,798 | 343,776 | 30,965 | 3,359 | 268,993 | 13,257 | 995 | 69,347 | 5,535 |
| Distrito Federal | 13,132 | 1,112 | 75 | 27,039 | 1,889 | 115 | 13,407 | 4,544 | 1,710 | 28,934 | 5,281 | 3,290 |
| Espírito Santo | 20,750 | 699 | 128 | 11,480 | 393 | 69 | 15,565 | 514 | 51 | 8,753 | 377 | 44 |
| Goiás | 52,629 | 5,525 | 2,349 | 99,830 | 9,395 | 4,923 | 93,677 | 12,495 | 163 | 223,823 | 18,634 | 174 |
| Maranhão | 61,712 | 25,654 | 42,798 | 20,790 | 18,441 | 23,893 | 2,545 | 25,313 | 7,841 | 935 | 16,842 | 3,574 |
| Mato Grosso | 12,070 | 5,476 | 1,520 | 19,339 | 8,421 | 3,023 | 69,441 | 129,713 | 7,875 | 127,552 | 165,277 | 12,375 |
| Mato Grosso do Sul | 11,589 | 1,378 | 242 | 12,577 | 1,632 | 180 | 9,341 | 556 | 123 | 12,857 | 445 | 118 |
| Minas Gerais | 217,545 | 43,864 | 11,073 | 270,034 | 46,094 | 12,338 | 237,235 | 14,409 | 5,426 | 421,609 | 9,120 | 3,152 |
| Pará | 24,951 | 36,332 | 24,313 | 14,163 | 27,818 | 12,940 | 2,706 | 9,753 | 2,899 | 3,380 | 7,569 | 1,901 |
| Paraíba | 52,565 | 198,468 | 38,010 | 22,703 | 79,030 | 20,707 | 16,809 | 55,935 | 11,711 | 3,867 | 11,256 | 7,564 |
| Paraná | 316,788 | 8,489 | 4,202 | 477,809 | 10,917 | 3,672 | 234,066 | 821 | 913 | 381,010 | 1,114 | 2,071 |
| Pernambuco | 136,947 | 238,566 | 49,346 | 76,965 | 94,759 | 27,400 | 39,447 | 63,233 | 12,452 | 12,785 | 14,256 | 5,421 |
| Piauí | - | 228,463 | 51,339 | - | 91,785 | 19,174 | 1,425 | 148,417 | 1,883 | 326 | 39,242 | 457 |
| Rio de Janeiro | 4,674 | 935 | 453 | 5,628 | 1,477 | 890 | 1,174 | 529 | 53 | 1,415 | 967 | 64 |
| Rio Grande do Norte | 13,682 | 156,496 | 1,813 | 7,350 | 67,491 | 649 | 1,468 | 35,162 | 13,304 | 482 | 9,227 | 7,965 |
| Rio Grande do Sul | 190,178 | 343 | 562 | 107,089 | 319 | 420 | 50,403 | 420 | 134 | 67,091 | 801 | 199 |
| Rondônia | 71,031 | 22,220 | 6,426 | 12,623 | 14,689 | 6,901 | 2,638 | 356 | 166 | 2,479 | 224 | 130 |
| Roraima | 116 | 234 | 469 | 88 | 124 | 211 | 277 | 3,526 | 474 | 754 | 3,333 | 371 |
| Santa Catarina | 121,737 | 1,305 | 1,808 | 183,585 | 1,660 | 2,480 | 58,141 | 38 | 124 | 101,499 | 58 | 185 |
| São Paulo | 71,654 | 21,456 | 6,918 | 122,909 | 34,218 | 13,334 | 81,838 | 1,507 | 1,281 | 206,051 | 1,754 | 1,756 |
| Sergipe | 22,893 | 15,344 | 12,652 | 14,719 | 8,622 | 4,554 | 3,911 | 1,499 | 1,615 | 2984 | 786 | 1,040 |
| Tocantins | 1,732 | 3,514 | 1,089 | 2,612 | 1,429 | 491 | 6,265 | 19,561 | 1,152 | 4759 | 16,111 | 971 |
| Brasil = Σ | 2,023,567 | 2,189,768 | 514,231 | 1,951,389 | 1,136,694 | 306,473 | 1,065,819 | 928,690 | 118,614 | 1,686,351 | 458,067 | 70,543 |

Fonte: elaborado com base em dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2012; 2019). F.comum = *Phaseolus vulgaris*; Caupi = *Vigna unguiculata*; Mungo = *Vigna radiata*.

Anexo 2. Preço da tonelada de ureia em cada unidade da federação (em US\$) e preços médios pagos pela ureia no Brasil em 2006 e 2017.

| Estados | 2006 | 2017 |
|---------------------|--------|--------|
| Acre | 635.91 | 469.43 |
| Alagoas | 635.91 | 469.43 |
| Amapá | 635.91 | 469.43 |
| Amazonas | 635.91 | 469.43 |
| Bahia | 618.46 | 419.35 |
| Ceará | 616.24 | 461.05 |
| Distrito Federal | 525.14 | 550.63 |
| Espírito Santo | 613.47 | 591.56 |
| Goiás | 525.36 | 500.06 |
| Maranhão | 635.91 | 456.69 |
| Mato Grosso | 508.73 | 403.47 |
| Mato Grosso do Sul | 541.32 | 479.42 |
| Minas Gerais | 512.06 | 506.82 |
| Pará | 635.91 | 469.43 |
| Paraíba | 635.91 | 469.43 |
| Paraná | 491.44 | 454.08 |
| Pernambuco | 610.86 | 455.13 |
| Piauí | 635.91 | 469.43 |
| Rio de Janeiro | 613.47 | 469.43 |
| Rio Grande do Norte | 715.55 | 458.66 |
| Rio Grande do Sul | 506.24 | 411.84 |
| Rondônia | 635.91 | 469.43 |
| Roraima | 635.91 | 521.46 |
| Santa Catarina | 516.13 | 423.42 |
| São Paulo | 714.88 | 496.36 |
| Sergipe | 618.46 | 469.43 |
| Tocantins | 635.91 | 513.64 |
| Média | 601.59 | 474.00 |

Os valores corrigidos foram convertidos para dólares em 30 de junho de 2023 [US\$1 = R\$4,90] (BCB, 2023).