

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

Thaís Ferreira Bicalho

Atributos agrofisiológicos do feijão-guandu e biológicos do solo sob manejos de adubação nitrogenada

Thaís Ferreira Bicalho

Atributos agrofisiológicos do feijão-gandu e biológicos do solo sob manejos de adubação nitrogenada

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal.

Orientador: Leidivan Almeida Frazão

Coorientador: Evander Alves Ferreira

Bicalho, Thaís Ferreira .

B583a
2022

Atributos agrofisiológicos do feijão-guandu e biológicos do solo sob manejos de adubação nitrogenada [manuscrito] / Thaís Ferreira Bicalho. Montes Claros, 2022.
55.f.: il.

Tese (doutorado) - Área de concentração em Produção Vegetal. Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientador(a): Leidivan Almeida Frazão.

Banca examinadora: Rodinei Facco Pegoraro; Márcia Martins; Michele Xavier Vieira Megda; Felipe José Cury Fracetto; Evander Alves Ferreira.

Inclui referências: f. 14-19; 34-36; 49-54.

1. Guandu. 2. Fotossíntese. 3. Urease. I. Frazão, Leidivan Almeida. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 633.35



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

ATA DE DEFESA DE TESE

Aos 20 dias do mês de abril de 2022, às 14:00 horas, sob a Presidência da Professora Leidivan Almeida Frazão, D. Sc. (Orientadora - ICA/UFMG), com a participação do Pesquisador Evander Alves Ferreira, D. Sc. (Coorientador - ICA/UFMG), dos Professores Rodinei Facco Pegoraro, D. Sc. (ICA/UFMG), Márcia Martins, D. Sc. (ICA/UFMG), Michele Xavier Vieira Megda, D. Sc. (UNIMONTES), e do Pesquisador Felipe José Cury Fracetto, D. Sc. (UFRPE), reuniu-se, por videoconferência, a Banca de Tese de **Thaís Ferreira Bicalho**, aluna do Curso de Doutorado em Produção Vegetal. Como resultado da defesa de tese intitulada "**Atributos agrofisiológicos do feijão-guandu e biológicos do solo sob manejos de adubação nitrogenada**", a aluna foi considerada **APROVADA**. E, para constar, eu, Professora Leidivan Almeida Frazão, Presidente da Banca, lavrei a presente ata que depois de lida e aprovada, será assinada por mim e pelos demais membros da Banca examinadora.

OBS.: A aluna somente receberá o título após cumprir as exigências do **ARTIGO 68** do regulamento do Curso de Doutorado em Produção Vegetal, conforme apresentado a seguir:

Art. 68 Para dar andamento ao processo de efetivação do grau obtido, o candidato deverá, após a aprovação de sua Dissertação ou Tese e da realização das modificações propostas pela banca examinadora, se houver, encaminhar à secretaria do Colegiado do Programa, com a anuência do orientador, no mínimo 3 (três) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da dissertação ou, 4 (quatro) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da tese, no prazo de 60 (sessenta) dias.

Montes Claros/MG, 20 de abril de 2022.

Leidivan Almeida Frazão
Orientadora

Evander Alves Ferreira
Coorientador

Rodinei Facco Pegoraro
Membro

Márcia Martins
Membro

Michele Xavier Vieira Megda
Membro

Felipe José Cury Fracetto
Membro



Documento assinado eletronicamente por **Leidivan Almeida Frazao, Professora do Magistério Superior**, em 21/04/2022, às 11:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcia Martins, Professora do Magistério Superior**, em 21/04/2022, às 14:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Felipe José Cury Fracetto, Usuário Externo**, em 21/04/2022, às 14:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Michele Xavier Vieira Megda, Usuário Externo**, em 21/04/2022, às 14:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Evander Alves Ferreira, Professor do Magistério Superior - Visitante**, em 21/04/2022, às 16:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodinei Facco Pegoraro, Professor do Magistério Superior**, em 26/04/2022, às 10:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1402313** e o código CRC **0E31B7AB**.

AGRADECIMENTOS

A Deus e Nossa Senhora, por me conduzirem neste caminho, me fortalecendo diante das adversidades e renovando as esperanças.

Aos meus pais, Amilton Cardoso Bicalho e Simone Ferreira Cardoso, por acreditarem nos meus sonhos, apoiarem as minhas decisões e não medirem esforços para meu crescimento pessoal e profissional.

As minhas irmãs, Silvana Ferreira Bicalho e Ana Clara Ferreira Bicalho, pelo incentivo e o companheirismo.

Aos meus queridos sobrinhos, Emanuel Amilton Rodrigues Bicalho, Mateus Rodrigues Bicalho e Davi Luís Rodrigues Bicalho, pela alegria e simplicidade.

Aos familiares e amigos, as orações e a torcida. À Universidade Federal de Minas Gerais pela oportunidade de realização do Doutorado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, em especial ao Grupo de Estudos em ILPF/UFMG e ao PET/Agronomia, pelo auxílio na condução dos experimentos.

À Prof^a. Dr^a. Leidivan Almeida Frazão e ao prof^o Evander Alves Ferreira, pela orientação e confiança na realização deste projeto.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão de recurso financeiro para realização do projeto de pesquisa.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste sonho.

A conquista é nossa.
Muito obrigada!!!

ATRIBUTOS AGROFISIOLÓGICOS DO FEIJÃO-GUANDU E BIOLÓGICOS DO SOLO SOB MANEJOS DE ADUBAÇÃO NITROGENADA

RESUMO

O efeito combinado da adubação nitrogenada e da fixação biológica de nitrogênio ainda é pouco conhecido em relação aos aspectos agrofisiológicos do feijão-guandu e aos atributos microbiológicos do solo após o seu cultivo. Assim, o objetivo desta pesquisa foi avaliar as respostas fisiológicas e agrônômicas do feijão-guandu (*Cajanus cajan* (L) Millsp.) e a qualidade biológica do solo em função dos manejos de adubação nitrogenada e inoculação com *Rhizobium tropici*. O estudo foi conduzido em casa de vegetação em delineamento experimental de blocos completos casualizados, com três repetições, em esquema fatorial 3x5, onde o primeiro fator correspondeu aos genótipos de feijão-guandu avaliados: BRS03, BRS04 e IAPAR 43. O segundo fator correspondeu aos manejos de adubação e inoculação: i) apenas adubação base; ii) adubação de base com nitrogênio e inoculante; iii) adubação de base e nitrogênio; iv) adubação de base e inoculante e; v) sem a aplicação de fertilizante ou inoculante. A adubação base foi composta por micronutrientes e macronutrientes, com exceção do nitrogênio. A adubação nitrogenada foi realizada com Ureia P.A. As parcelas experimentais foram constituídas por uma planta por vaso com volume de 10 dm³. Foram avaliadas as respostas fisiológicas relacionadas a fotossíntese, dentre elas a concentração interna de carbono; taxa transpiratória; condutância estomática; taxa fotossintética líquida aos 21, 37 e 60 dias após a emergência das plântulas, com auxílio do analisador portátil de gás por infravermelho. No pleno florescimento procedeu-se a coleta de solo numa profundidade de 0-20 cm, próximo ao sistema radicular para avaliações da qualidade biológica do solo, sendo determinado o carbono orgânico total; nitrogênio total; carbono e nitrogênio da biomassa microbiana; respiração basal do solo; atividade da enzima β -glicosidase e urease. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade e, adicionalmente, foi realizada análise multivariada dos dados. Aos 60 dias da emergência, a adubação base associada a fonte nitrogenada possibilitou ganhos fotossintéticos, com média de 26,77 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, enquanto a ausência de adubação foi de 8,17 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Os genótipos BRS03 e BRS04 apresentaram maiores índices de clorofila a e b e, conseqüentemente, maior taxa fotossintética líquida, aos 21 dias de cultivo. Aos 60 dias, esses mesmos genótipos apresentaram valores de pigmentos bem próximos a cultivar IAPAR 43. Os tratamentos que contêm macronutrientes e micronutrientes, independentemente do fornecimento de nitrogênio, proporcionou maiores valores para as características clorofila a e b, taxa fotossintética líquida, altura de plantas e massa seca radicular. A análise canônica evidenciou alta correlação positiva entre a condutância estomática, fotossíntese e transpiração, enquanto a concentração interna de carbono foi negativa. O genótipo IAPAR 43 floresceu aos 73 dias, BRS03 e BRS04, aos 169 e 171 dias, respectivamente. Esse comportamento influenciou na altura de plantas, no número de nós e no comprimento da raiz principal. A aplicação de N mineral e inoculação do feijão-guandu incrementou o N total do solo, aumentou a atividade das enzimas β -glicosidase e urease no solo, de forma que a associação dessas fontes favoreceu a mineralização deste nutriente no solo. Os genótipos BRS03 e BRS04 demandaram maior tempo para florescimento e obtiveram maior altura de plantas, número de nós na haste principal, massa seca aérea, comprimento da raiz principal e elevação nos teores de carbono microbiano e quociente microbiano do solo. A adubação base contribuiu para acréscimos de clorofila a e b, taxa fotossintética líquida, altura de plantas e massa seca radicular. Os genótipos BRS03 e BRS04 apresentaram maiores teores de carbono orgânico e microbiológico. Com base nos resultados obtidos, verificou-se que os genótipos BRS03 e BRS04 demonstraram potencial para uso como adubos verdes, uma vez que apresentaram maior produção de biomassa, enquanto o genótipo IAPAR 43 pode ter maior aptidão para grãos, pois o seu ciclo é menor. O estudo evidenciou que o fornecimento de fontes nitrogenadas para o feijão-guandu pode ser efetivo para o seu crescimento e produção, seja via inoculação ou adubação mineral.

Palavras-chave: *Cajanus cajan* (L) Millsp. β -glicosidase. Taxa fotossintética. Urease.

AGROPHYSIOLOGICAL ATTRIBUTES OF PIGEON PEA AND SOIL BIOLOGICAL ATTRIBUTES UNDER NITROGEN FERTILIZATION MANAGEMENT

ABSTRACT

The combined effect of nitrogen fertilization and biological nitrogen fixation is still poorly understood concerning the agrophysiological aspects of pigeon pea and the microbiological attributes of the soil after its cultivation. Thus, the objective of this research was to evaluate the physiological and agronomic responses of pigeon pea (*Cajanus cajan* (L) Millsp.) and soil biological quality as a function of nitrogen fertilization and inoculation with *Rhizobium tropici*. The study was carried out in a greenhouse in a randomized complete block experimental design, with three replications, in a 3x5 factorial scheme, where the first factor corresponded to the evaluated pigeon pea genotypes BRS03, BRS04 and IAPAR 43. The second factor corresponded to the evaluated pigeon pea genotypes BRS03, BRS04 and IAPAR 43, fertilization and inoculation managements: i) only base fertilization; ii) base fertilization with nitrogen and inoculant; iii) base and nitrogen fertilization; iv) base and inoculant fertilization and; v) without the application of fertilizer or inoculant. The base fertilization consisted of micronutrients and macronutrients, except nitrogen. Nitrogen fertilization was performed with Urea P.A. The experimental plots consisted of one plant per pot with a volume of 10 dm³. Physiological responses related to photosynthesis were evaluated, including the internal carbon concentration; transpiration rate; stomatal conductance; net photosynthetic rate at 21, 37 and 60 days after seedling emergence, with the aid of a portable infrared gas analyzer. At full flowering, the soil was collected at a depth of 0-20 cm, close to the root system, to evaluate the biological quality of the soil, and the total organic carbon; total nitrogen; carbon and nitrogen from microbial biomass; basal soil respiration; β -glucosidase and urease enzyme activity was determined. The data obtained were submitted for analysis of variance and the means were compared by the Tukey test, at 5% probability, additionally, a multivariate analysis of the data was performed. At 60 days after emergence, the base fertilization associated with a nitrogen source allowed photosynthetic gains, with an average of 26.77 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, while the absence of fertilization was 8.17 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. The genotypes BRS03 and BRS04 showed higher levels of chlorophyll a and b and, consequently, higher net photosynthetic rate, at 21 days of cultivation. At 60 days, these same genotypes showed pigment values very close to those of cultivar IAPAR 43. Treatments containing macronutrients and micronutrients, regardless of nitrogen supply, provided higher values for the characteristics chlorophyll a and b, net photosynthetic rate, plant height and mass, and root drought. Canonical analysis showed a high positive correlation between stomatal conductance, photosynthesis and transpiration, while the internal carbon concentration was negative. The IAPAR 43 genotype flowered at 73 days, BRS03 and BRS04, at 169 and 171 days, respectively. This behavior influenced plant height, number of nodes and main root length. The application of mineral N and inoculation of pigeon pea increased the total N, the activity of β -glucosidase and urease enzymes in the soil so that the association of these sources favored the mineralization of this nutrient. The genotypes BRS03 and BRS04 required longer flowering time and obtained greater plant height, number of nodes on the main stem, aerial dry mass, main root length and increase in microbial carbon and soil microbial quotient. The base fertilization contributed to increases in chlorophyll a and b, net photosynthetic rate, plant height and root dry mass. The BRS03 and BRS04 genotypes showed higher levels of organic and microbiological carbon. Based on the results obtained, it was found that the BRS03 and BRS04 genotypes showed potential for use as green manures, since they presented higher biomass production, while the IAPAR 43 genotype may have greater aptitude for grains, as its cycle is shorter. The study showed that the supply of nitrogen sources for pigeon pea can be effective for its growth and production, either via inoculation or mineral fertilization.

Keywords: *Cajanus cajan* (L) Millsp. β -glucosidase. Photosynthetic rate. Urease.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	10
2.1	Objetivo Geral.....	10
2.2	Objetivos Específicos.....	10
3	REVISÃO DE LITERATURA	11
3.1	Origem e importância do feijão-guandu	11
3.2	Formas de obtenção de nitrogênio e respostas agrofisiológicas do feijão-guandu.....	11
3.3	Indicadores microbiológicos de qualidade do solo	13
3.4	Referências.....	14
4	ARTIGOS	20
4.1	Artigo 1- Adubação nitrogenada e inoculação de <i>Rhizobium tropici</i> e respostas agrofisiológicas do feijão-guandu	20
4.2	Artigo 2- Atividade biológica do solo cultivado com feijão-guandu sob manejos de adubação nitrogenada	37
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	55

1 INTRODUÇÃO

A adubação nitrogenada representa um dos manejos mais onerosos em relação aos custos de produção agrícola, podendo ocasionar impactos ambientais. A aplicação de adubos nitrogenados sintéticos pode proporcionar perdas de até 50% por meio dos processos de volatilização e lixiviação nas épocas chuvosas e/ou de irrigação intensa. O nitrogênio perdido pelo processo de desnitrificação acarreta intensificação do efeito estufa pela emissão de N_2O , e a lixiviação de NO_3^- potencializa a contaminação de lençóis freáticos, rios e lagos (STRALIOTTO *et al.*, 2002; VIERO *et al.*, 2015).

Nesse contexto, a fixação biológica de nitrogênio (FBN) é uma alternativa para aumentar a sustentabilidade da agricultura, já que o uso de rizobactérias possibilitam a redução do uso de fertilizantes nitrogenados, minimizando os impactos ambientais, além de contribuir para a diminuição dos custos de produção e proporcionar diversos benefícios ao solo. Percebe-se um aumento considerável de utilização de sistemas agrícolas que adotam essa ferramenta nas últimas décadas, devido à crescente demanda de produção e do cenário de mudanças climáticas.

As bactérias fixadoras de N_2 , como as do gênero *Rhizobium*, utilizam os carboidratos incorporados pela planta através da fotossíntese e promove o processo de FBN, enquanto a planta é beneficiada pelo nitrogênio fixado pela bactéria (STRALIOTTO, 2002). Sabe-se que o nitrogênio é componente essencial de proteínas, ácidos nucleicos, clorofila e outros compostos necessários as mais diversas formas de vida. No solo, seu fornecimento via processo natural de fixação biológica proporciona o suprimento de N necessário aos microrganismos, que são essenciais a produção agrícola e conservação do solo.

O feijão-gandu (*Cajanus cajan* (L) Millsp.) é uma leguminosa utilizada na alimentação humana e animal, uso medicinal e para conservação do solo e da água. Apesar do potencial agrícola e ecológico, as respostas fisiológicas e agronômicas, em função da inoculação com rizobactérias combinada com o uso de fertilizantes sintéticos, ainda são pouco conhecidas, assim como as respostas dos indicadores biológicos de qualidade do solo.

A disponibilidade de nitrogênio é um fator limitante ao desenvolvimento dessa cultura. A deficiência ou mesmo ausência desse nutriente contribui para redução ou inviabilização do processo fotossintético, uma vez que esse elemento é constituinte do pigmento clorofila. Além desse aspecto fisiológico, há também a influência na atividade microbiana do solo, podendo ocorrer o estímulo ou inibição da fixação biológica. O efeito combinado da adubação nitrogenada e da fixação biológica de nitrogênio ainda é pouco conhecido em relação aos aspectos agrofisiológicos do feijão-gandu e aos atributos microbiológicos do solo após o seu cultivo. Assim, este estudo foi realizado com o pressuposto de que o manejo da adubação nitrogenada no cultivo do feijão-gandu, mesmo sendo uma cultura que apresenta “rusticidade” às condições adversas, pode proporcionar respostas fisiológicas positivas e melhoria na qualidade biológica do solo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar as respostas fisiológicas e agronômicas do feijão-gandu (*Cajanus cajan* (L) Millsp.) e a qualidade biológica do solo em função dos manejos de adubação nitrogenada e inoculação com *Rhizobium tropici*.

2.2 Objetivos Específicos

Determinar os componentes de produção do feijão-gandu em função dos manejos de adubação base, nitrogenada e inoculação.

Avaliar as respostas fisiológicas do feijão-gandu em função dos manejos de adubação nitrogenada aos 21, 37 e 60 dias após a emergência das plantas.

Avaliar os atributos microbiológicos do solo após o cultivo de feijão-gandu sob diferentes manejos de adubação nitrogenada.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Origem e importância do feijão-guandu

Cajanus cajan (L.) Mill sp., conhecido popularmente como feijão “guandu”, “guandú”, “guando”, “gandu” ou “andu”, pertence à família das Fabaceae. É uma planta ereta, arbustiva, de pleno sol e autógama, apesar de apresentar altas taxas de fecundação cruzada, de até 70%. Possui como provável centro de origem a Índia e foi trazido para o Brasil por descendentes africanos (GODOY; SANTOS, 2011). A área estimada globalmente é em torno de 5,4 milhões de hectares, com produção anual de 4,49 milhões de toneladas, sendo cultivado em 82 países do mundo (FAO STATISTICS, 2017). No Brasil ainda é incipiente seu cultivo, sendo muitas das vezes encontrados em quintais, voltados para subsistência ou fonte de renda familiar.

O feijão-guandu se destaca no cenário agrícola devido as suas características morfológicas, fisiológicas e ao seu potencial produtivo. Essa cultura é utilizada na alimentação humana e animal, sendo esse último decorrente da palatabilidade e ao alto rendimento, mesmo em condições de estiagem (DRUSHTANT *et al.*, 2020). Estimativas indicam que mais de um bilhão de pessoas a utilizam como principal fonte de proteínas (SINHA *et al.*, 2013). É empregada também em manejos para conservação do solo (SINGH *et al.*, 2020), recuperação e renovação de áreas degradadas (SUBHASISH *et al.*, 2019) e na indústria farmacológica (QING-YAN *et al.*, 2020).

Essa leguminosa é conhecida por possuir alta variabilidade genética, possuindo espécies anuais e perenes que se diferem principalmente pelo porte. Sua boa capacidade de enraizamento a grandes profundidades associada a FBN fazem com que essa espécie apresente considerável potencial para recuperação e conservação do solo (ALVARENGA *et al.*, 1995). Além disso, Calvo *et al.* (2010), em estudos do feijão-guandu anão, verificaram sua influência sobre a relação C/N das palhadas produzidas nos consórcios dessa leguminosa com milho e sorgo, sendo que o feijão-guandu anão reduziu significativamente a relação C/N desse ambiente e, assim, contribuiu para maior disponibilidade de nutrientes ao intensificar a mineralização (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Além desses usos, também pode ser utilizada na adubação verde. Dentre os benefícios estão o aumento na capacidade de infiltração de água no solo, proteção contra erosão, melhora da estrutura do solo, aumento do teor de matéria orgânica no solo, da capacidade de troca catiônica (CTC) e da soma de bases (SB), auxílio no controle de pragas como fitonematóides e maior equilíbrio das populações microbianas, evitando pragas (AMBROSANO *et al.*, 2005).

3.2 Formas de obtenção de nitrogênio e respostas agrofisiológicas do feijão-guandu

O nitrogênio é um elemento essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas, pois é constituinte de biomoléculas, tais como proteínas, ácidos nucléicos e clorofilas. A deficiência desse nutriente pode afetar importantes processos metabólicos e fisiológicos, como a translocação de fotoassimilados, respiração, fotossíntese e crescimento foliar (TAIZ *et al.*, 2017). De acordo com Kappes *et al.* (2009), a ausência desse elemento configura como um dos principais fatores limitantes à produtividade de grãos.

Uma das formas de obtenção do nitrogênio na forma iônica, modo em que é absorvível pelas plantas (NH_4^+ e NO_3^-), se dá por meio da fixação biológica (FBN). A FBN é um processo que ocorre entre determinados gêneros de bactérias e alguns grupos plantas, onde há a conversão do nitrogênio atmosférico (N_2) em amônia (NH_3), sendo um processo importante no ciclo biogeoquímico do nitrogênio (TAIZ *et al.*, 2017).

Os microrganismos envolvidos na FBN podem ser de vida livre, associativos ou fixadores simbióticos. Nas leguminosas, o N_2 é convertido em amônia, sendo que essa é protonada em amônio (NH_4^+) por meio de bactérias fixadoras dos gêneros *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Azorizhobium*, *Photorizhobium* e *Sinorizhobium*. Essa reação é catalisada pelo complexo da enzima nitrogenase (Vergara e Araújo, 2021).

Dentre os benefícios da FBN estão a redução do uso de fertilizantes nitrogenados que, por conseguinte, contribui para minimizar o risco de contaminação dos cursos d'água e do solo, além de refletir também no custo de produção (BORTOLOTTI *et al.*, 2012). No Brasil, a cultura da soja utiliza o nitrogênio em sua totalidade via FBN por bactérias do gênero *Bradyrhizobium* (HUNGRIA *et al.*, 2007). Com isso, há a redução dos custos de produção e dos efeitos poluidores da atmosfera, decorrentes da adubação nitrogenada sintetizada, contribuindo para a redução do efeito estufa (STRALIOTTO *et al.*, 2002; VIERO *et al.*, 2015). Nesse sentido, a FBN é apontada como uma das estratégias que compõem o Plano Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (ABC), elaborado de acordo com o artigo 3º do Decreto 7.390/2010, que visa promover a mitigação da emissão de GEE na agricultura, contribuindo para a adaptação do setor agropecuário às mudanças climáticas (BRASIL, 2010).

Os processos fisiológicos que envolvem a FBN são complexos e envolvem agentes sinalizadores entre a planta e bactéria fixadora. A relação existente entre bactérias do gênero *Bradyrhizobium* e leguminosas é descrita com frequência na literatura (PERIN *et al.*, 2018; FITTON *et al.*, 2019) e é caracterizada pela formação de nódulos, no qual são estruturas especializadas nas raízes, ligados à epiderme por filamentos (SEDIYAMA *et al.*, 2016).

A eficiência da nodulação é influenciada por fatores internos e externos, sendo que a compreensão desses, num sistema de cultivo, possibilita adequar o manejo da planta, visando ganhos de produtividade de grãos e otimização de produção. A presença ou ausência de nitrogênio no solo tem efeitos diretos no sucesso da simbiose (VIEIRA *et al.*, 2005), de modo que tanto o excesso quanto a falta podem ser prejudiciais a formação dos nódulos nas raízes e na fixação biológica de nitrogênio (HUNGRIA *et al.*, 2007). Para obter resultados satisfatórios e melhor usufruir dos benefícios desse processo, a inoculação de rizobactérias se torna necessária (PRIMAVESI & PRIMAVESI, 2018). Alguns autores verificaram a eficiência da inoculação de rizobactérias em feijoeiro comum, obtendo aumentos consideráveis da nodulação e da produtividade (ARAÚJO *et al.*, 2007; RAMIRES *et al.*, 2018; ROCHA *et al.*, 2022).

A nodulação causa alterações anatômicas e fisiológicas nas plantas e possui agentes sinalizadores entre a planta e bactéria fixadora (GERAHTY *et al.*, 1992; TIMMERS *et al.*, 1999; TAIZ *et al.*, 2017). De acordo com Timmers *et al.* (1999), a bactéria migra em direção às raízes em função de exsudados de isoflavonóides e betaínas secretadas pelas raízes (resposta quimiostática). A presença da bactéria junto ao sistema radicular da planta ativa enzimas, nas quais induzem a transcrição de genes Nod. O contato estabelecido entre bactéria fixadora e os pelos radiculares liberam fatores de nodulação (nod), ocasionando, assim, enrolamentos. A formação do nódulo é decorrente de sucessivas divisões mitóticas

ocorridas dentro e fora do córtex radicular.

O feijão-guandu se destaca na capacidade de acumulação de biomassa e de fixação biológica de N, sendo que em condições favoráveis de cultivo, é possível fixar até 200 kg ha⁻¹ de N por meio do processo biológico (KUMAR RAO e DART, 1987; ADU-GYAMFI *et al.*, 2007).

As características agrofisiológicas são expressões fenotípicas que variam de acordo com o genótipo, ambiente ou interação genótipos por ambiente (CRUZ *et al.*, 2014). Kerbauy (2019) ratifica que essa plasticidade pode ocorrer dentro de certo limite de tempo, de curto a longo prazo, a depender de cada espécie. O manejo de adubação e inoculação pode ser um dos fatores que contribuem para resposta diferencial das plantas, que pode ser percebida pela expressão desses caracteres.

Considerando a cultura do feijoeiro, Bernardes *et al.* (2014) afirmam acerca da dificuldade de resultados convergentes de estudos científicos que norteiam as adubações nitrogenadas, devido ao efeito do genótipo (cultivar/linhagem) e às questões ambientais (composição do solo, teor de matéria orgânica, cultura anterior e outros). Apesar da alta capacidade simbiótica do feijão-guandu com determinados grupos de bactérias fixadoras de N, Ferreira *et al.* (2009) consideram que seja necessário a inoculação de cepas bacterianas a fim de tornar esse processo mais eficiente, já que esse sofre influência da cultivar utilizada e das condições ambientais. Além disso, Brito *et al.* (2015) afirmam que, aliado ao processo de inoculação deve ocorrer, de maneira complementar, o uso de fertilizantes nitrogenados, pois a inoculação possui resposta inconstante frente a diversidade de rizóbios no campo.

3.3 Indicadores microbiológicos de qualidade do solo

Estudos apontam a importância do uso de indicadores biológicos devido a sensibilidade as alterações ambientais. Os indicadores da qualidade biológica do solo possibilitam o monitoramento das respostas frente aos diferentes manejos, bem como avaliar a sustentabilidade da produção agrícola (GONÇALVES *et al.*, 2020; STIEVEN *et al.*, 2020). A matéria orgânica do solo (MOS), a depender das práticas de manejo, pode ser alterada em sua quantidade e qualidade. No que se refere a qualidade, essa está intimamente associada aos atributos do solo, como o carbono e nitrogênio da biomassa microbiana, atividade enzimática, respiração do solo, quocientes metabólico e microbiano e carbono orgânico.

A atividade biológica do solo é muito sensível a qualquer tipo de modificação que interfira no crescimento e desenvolvimento dos microrganismos, tais como: alterações na disponibilidade de água ou nutrientes, aeração, proximidade da rizosfera, presença de animais e plantas diversas. Esses fatores podem interferir no crescimento dos microrganismos, favorecendo ou não determinadas espécies, bem como na diversidade microbiana, que promove papéis diferentes no ecossistema (DANCE, 2008; MATOSO *et al.*, 2012). Assim, compreender como os microrganismos interagem entre si e no solo são fundamentais para criar um ambiente saudável e equilibrado, favorecendo o sucesso e a sustentabilidade das atividades agrícolas (DANCE, 2008; AMARANTE *et al.*, 2018).

A biomassa microbiana, considerada a parte viva e mais ativa da matéria orgânica, contém de 2 a 5% do carbono orgânico total (JENKINSON e LADD, 1981) e de 1 a 5% do N total no solo (SMITH e PAUL, 1990), apesar desses valores baixos, possuem função extremamente importante. Fungos e bactérias, principalmente, são responsáveis pela decomposição e transformação da matéria orgânica, além de influenciar no fluxo de C e N, ciclagem de nutrientes e estruturação do solo. A disponibilidade de carbono

e nitrogênio no solo pode intervir na sobrevivência dos microrganismos, uma vez que estes nutrientes são usados como fontes de energia (CARDOSO; ANDREOTE, 2016).

A relação C/N também é um importante indicador de disponibilidade de nutrientes para o solo, uma vez que está diretamente relacionada ao processo de mineralização (AITA; GIACOMINI, 2003; SELLE, 2007). Araújo *et al.* (2019), avaliando a eficiência do consórcio entre milho e leguminosas, quantificaram o carbono microbiano nesse sistema de cultivo e compararam a condições ambientais naturais e cultivo solteiro. Segundo esses autores, os consórcios de milho com crotalária e feijão-guandu anão obtiveram carbono da biomassa microbiana e quociente microbiano semelhante a do solo na condição natural. Assim, é possível perceber a importância de tais indicadores, já que demonstram a eficiência, neste caso, do consórcio com leguminosas sobre a qualidade do solo.

A atividade biológica do solo é essencial para compreensão dos efeitos dos diferentes manejos agrícolas, permitindo desenvolver uma agricultura mais sustentável ao compreender as perturbações nos ecossistemas biológicos do solo através de indicadores (SILVA *et al.*, 2021). Essa atividade, basicamente, é a principal fonte de enzimas relacionada a atividade microbiana do solo, sendo que algumas das propriedades do solo são decorrentes da ação e das interações entre as comunidades de diferentes organismos (SANTANA *et al.*, 2017).

A atividade enzimática e microbiana tem sido utilizada como indicadores potenciais de qualidade do solo, uma vez que possuem rápidas respostas em mudanças externas ocasionadas por diferentes manejos (PANDEY *et al.*, 2014; RASOOL *et al.*, 2014). Dentre estas enzimas, podem ser citadas a β -glicosidase e a urease, envolvidas no ciclo do carbono (C) e nitrogênio (N), respectivamente. A β -glicosidase está diretamente associada a degradação da celulose, fornecendo glicose, principal fonte de C para os microrganismos (WANG *et al.*, 2010). Já a urease hidrolisa compostos nitrogenados em CO₂ e nitrogênio amoniacal, indispensável para o ciclo do nitrogênio (DICK *et al.*, 1997). Vieira e Ramos (2019) realizaram estudo a fim de avaliar a atividade enzimática e a atividade microbiológica em área cultivada com cana-de-açúcar em diferentes manejos de palhada e inoculação com bactérias promotoras de crescimento. Os autores concluíram que houve elevada associação da atividade da urease sobre a decomposição do N-orgânico.

3.4 Referências

ADU-GYAMFI, J. J.; MYAKA, F. A.; SAKALA, W. D.; ODGAARD, R.; VESTERAGER, J. M.; JENSEN, H. H. Biological nitrogen fixation and nitrogen and phosphorus budgets in farmer-managed intercrops of maize–pigeonpea in semi-arid southern and eastern. **Africa Plant Soil**, v. 295, p. 127–136, 2007.

AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura de solo solteiras e consorciadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 4, p. 601-612, 2003.

ALVARENGA, R. C.; COSTA, L. M.; MOURA FILHO, W.; REGAZZI, A. J. Características de alguns adubos verdes de interesse para a conservação e recuperação de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 30, n. 2, p. 175-185, 1995.

AMARANTE, E. A. L. D.; FÜLBER, V. M.; ZONIN, W. J.; NOVAKOSKI, R.; PLEIN, C. Agricultura familiar e a sustentabilidade: novos arranjos e processos. **Brazilian Journal of Development**, v. 4, n. 7, p. 4419-4432, 2018.

AMBROSANO, E. J.; GUIRALDO, N.; CANTARELLA, H.; ROSSETTO, R.; MENDES, P. C. D.; ROSSI, F.; AMBROSANO, G. M. B.; AREVALO, R. A.; SCHAMMAS, E. A.; JUNIOR, I. A.; FOLTRAN, D. E. **Plantas para cobertura do solo e adubação verde aplicadas ao plantio direto**. Piracicaba: KP Potafos, 2005. 16 p.

ARAÚJO, F. F.; CARMONA, F. G.; TIRITAN, C. S. CRESTE, J. E. Fixação biológica de N₂ no feijoeiro submetido a dosagens de inoculante e tratamento químico comparado à adubação nitrogenada. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 29, n. 4, p. 535-540, 2007.

ARAÚJO, S. T.; GALLO, A. S.; ARAUJO, F. S.; SANTOS, L. C.; GUIMARÃES, N. F.; SILVA, R. F. Biomass and microbial activity in soil cultivated with maize intercropped with soil cover legumes. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 2, p. 347-357, 2019.

BERNARDES, T. G.; SILVEIRA, P. M.; MESQUITA, M. A. M.; CUNHA, P. C. R. Resposta do feijoeiro de outono-inverno a fontes e doses de nitrogênio em cobertura. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 2, p. 458-468, 2014.

BORTOLOTTI, R. P.; BRUNO, I. P.; REICHARDT, K.; TIMM, L. C.; AMADO, T. J. C.; FERREIRA, A. O. Nitrogen fertilizer (¹⁵N) leaching in a central pivot fertigated coffee crop. **Revista Ceres**, v. 59, n. 4, p. 466-475, 2012.

BRASIL. Decreto nº 7.390, de 9 de dezembro de 2010. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 9 dez. 2010.

BRITO, L. F.; PACHECO, R. S.; SOUZA FILHO, B. F.; FERREIRA, E. P. B.; STRALIOTTO, R.; ARAÚJO, A. P. 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, p. 981-992, 2015.

CALVO, C. L.; FOLONI, J. S. S.; BRANCALIÃO, S. R. Produtividade de fitomassa e relação C/N de monocultivos e consórcios de guandu-anão, milheto e sorgo em três épocas de corte. **Bragantia**, v. 69, n. 1, p. 77-86, 2010.

CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. **Microbiologia do solo**. 2. ed. Piracicaba: Esalq, 2016, 221 p.

CARDOSO, R. A.; BENTO, A. S.; MORESKI, H. M.; GASPAROTTO, F. Influência da adubação verde nas propriedades físicas e biológicas do solo e na produtividade da cultura de soja. **Semina: Ciências Biológicas e da Saúde**, v. 35, n. 2, p. 51-60, 2014.

CRUZ, C. D.; CARNEIRO, P. C. S. REGAZZI, A. J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. v. 2. Viçosa: UFV, 2014, 668 p.

DANCE A. Soil ecology: what lies beneath. **Nature**, v. 455, n. 9, p. 724-725, 2008.

DICK, R. P.; BREAKWELL, D. P.; TURCO, R. F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. **Soil Science Society of America**, v. 49, p. 247–272, 1997.

DRUSHTANT, U. B.; OSHIN, A. S.; ANUPAMA, A. P.; VITTHAL, T. B. Characterization of microRNA genes from Pigeonpea (*Cajanus cajan* L.) and understanding their involvement in drought stress. **Journal of Biotechnology**, v. 321, p. 23-34, 2020.

FAO STATISTICS. **Pigeon Producing Countries. Production and Area Harvested**. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2017.

FERREIRA, P. A. A.; SILVA, M. A. P.; CASSETARI, A.; RUFINI, M.; MOREIRA, F. M. S.; ANDRADE, M. J. B. Inoculação com cepas de rizóbio na cultura do feijoeiro. **Ciência Rural**, v. 39, n. 7, p. 2210-2212, 2009.

FITTON, N.; BINDI, M.; BRILLI, L.; CICHOTA, R.; DIBARI, C.; FUCHS, K.; HUGUENIN-ELIE, O.; KLUMPP, K.; LIEFFERING, M.; LÜSCHER, A.; MARTIN, R.; MCAULIFFE, R.; MERBOLD, L.; NEWTON, P.; REES, R.; SMITH, P.; TOPP, CFE.; SNOW, V. Modelling biological N fixation and grass-legume dynamics with process-based biogeochemical models of varying complexity. **European Journal of Agronomy**, v. 106, p. 58-66, 2019.

GERAHTY, N.; CAETANO-ANOLLÉS, G.; JOSHI, J. A.; GRESSHOFF, P. M. Anatomical analysis of nodule development in soybean reveals an additional auto regulatory control point. **Plant Science**, v. 58, p. 1-7, 1992.

GODOY, R.; SANTOS, P. M. *Cajanus cajan*. In: FONSECA, D. M.; MARTUSCELLO, J. A. (Ed.). **Plantas forrageiras**. Viçosa: UFV, 2011. p. 294-309.

GONÇALVES, A. C. S.; RUIVO, M. L. P.; PAULA, M. T.; CASTRO, R. M. S.; TEIXEIRA, O. M. M.; JUNIOR, P. M. S.; TORO, M. J. U. Avaliação dos indicadores biológicos do solo em plantios de palma de óleo, no Município de Santa Bárbara do Pará. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 2, p. 6959-6971, 2020.

HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; MENDES, I. C. **A importância do processo de fixação biológica de nitrogênio para a cultura da soja**: componente essencial para a competitividade do produto brasileiro. Embrapa Soja, 2007. 80 p. (Embrapa Soja. Documentos, 283).

JENKINSON, D. S.; LADD, J. N. Microbial biomass in soil: measurement and turnover. In: PAUL, E. A.;

LADD, J. N., (Eds). **Soil Biology and Biochemistry**, v. 5, p. 415-471, 1981.

KAPPES, C.; CARVALHO, M. A. C.; YAMASHITA, O. M.; SILVA, J. A. N. Influência do nitrogênio no desempenho produtivo do milho cultivado na segunda safra em sucessão à soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 39, n. 3, p. 251-259, 2009.

KERBAUY, G. B. *Fisiologia Vegetal*. Rio de Janeiro, RJ: Editora Guanabara Koogan, Ed. 3, 2019.

KUMAR RAO, J. V. D. K.; DART, P. J. Nodulação, fixação de nitrogênio e absorção de nitrogênio pelo feijão bóer (*Cajanus cajan* (L.) Millsp) de diferentes grupos de maturidade. **Solo planta**, v. 99, n. 2-3, p. 255 – 266, 1987.

MATOSO, S. C. G.; SILVA, A. N.; FIORELLI-PEREIRA, E. C.; COLETA, Q. P.; SOUZA, E. F. M. Frações de carbono e nitrogênio de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico sob diferentes usos na Amazônia brasileira. **Acta Amazônica**, v. 42, n. 2, p. 231-240, 2012.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do solo**. Lavras: Editora. UFLA, 2006. 744 p.

PERIN, J. G.; BERTÉLI, M. B. D.; VALLE, J. S.; LINDE, G. A.; PACCOLA-MEIRELLES, L. D.; COLAUTO, N. B.; BARCELLOS, F. G. Characterization of aapP and nopP genes related to the biological nitrogen fixation efficiency with soybean in contrasting strains of *Bradyrhizobium japonicum*. **Genetics and Molecular Research**, v. 17, n. 1, 2018.

PRIMAVESI, A.; PRIMAVESI, A. **A Biocenose do Solo na Produção Vegetal e Deficiências Minerais em Culturas, Nutrição e Produção Vegetal**. 1. ed. São Paulo: Expressão Popular, 2018. 608 p.

QING-YAN, G.; JIAO J.; XIN, W.; YU-JIE F.; YAO, L.; JING, L; ZI –YING, W.; XIAO-JIE, X. Establishment of *Cajanus cajan* (Linn.) Millsp. cell suspension cultures as an effective in vitro platform for the production of pharmacologically active phenolic compounds. **Industrial Crops and Products**, v. 158, p. 1-11, 2020.

RAMIRES, V. R; LIMA, D. F. S; SIMON, A. C; CONTARDI, M. L; ALVAREZ, F. C; SILVA BRASIL, M. Inoculação com rizóbio associado ao manejo da adubação nitrogenada em feijão comum. **Colloquium Agrariae**, v. 14, p. 49-57, 2018.

ROCHA, T. T. T.; CARVALHO, A. J. E.; LEMOS, J. P.; SILVA, I. R.; SANTOS, E. P. Nodulação do feijão - comum (*Phaseolus vulgaris* L. CV BRS Esteio) a partir de sementes tratadas com um inoculante alternativo e a influência da adubação foliar com molibdênio na FBN. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, 2022.

SANTANA, A. C.; CHAVES, J. S.; RODRIGUEZ, C. A. Biomassa microbiana em diferentes sistemas de manejo do solo no sul do estado de Roraima. **Revista Brasileira de Ciências da Amazônia**, p. 1-67, 2017.

SANTOS, F. C. R.; SILVA, L. S. M.; SILVA, E. L.; MIRANDA, A. M.; FREIRE, S. G. B. Biological activity in saline sodic soil saturated by water under cultivation of *Atriplex numulária*. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 3, p. 619-627, 2011.

SELLE, G. L. Ciclagem de Nutrientes em Ecossistemas Florestais. **Bioscience Journal**, v. 23, n. 4, p. 29-39, 2007.

SINHA, M.; SHAMIM, M. D.; PRIYA, S.; SINGH, K. N. Impressão digital de DNA de genótipos de guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp) por marcador RAPD para o melhoramento de novas variedades. **Indian Journal of Agricultural Biochemistry**, v. 26, p. 195-198, 2013.

SEDIYAMA, T.; OLIVEIRA, R. C. T.; SEDIYAMA, H. A. A soja. In: SEDIYAMA, T. (Ed.) **Produtividade da soja**. Londrina: Mecenias, 2016. 310 p.

SILVA, C. F.; PEREIRA, M. G.; PINTO, L. A. S. R.; TEODORO, S. A.; FONTES, M. A.; GOMES, J. H. G.; SILIVA, E. M. R. Soil attributes as indicators of the stabilization process of erosion in gullies at different formation stages in the South east region of Brazil. **Revista Ambiente & Água**, v. 16, n. 4, 2021.

SINGH, U.; CHOUDHARY, A. K.; SHARMA, S. Comparative performance of conservation agriculture vis-a-vis organic and conventional farming, in enhancing plant attributes and rhizospheric bacterial diversity in *Cajanus cajan*: A field study. **European Journal of Soil Biology**, v. 99, 2020.

STIEVEN, A. C.; MENDES, W. M.; WRUCK, F.; COUTRO, E. G.; CAMPOS, D. T. S. Atributos do solo em sistemas diferenciados de uso e manejo do solo em Mato Grosso, MT, Brasil. **Colloquium Agrariae**, v. 16, n. 2, p. 1-15, 2020.

STRALIOTTO, R.; TEIXEIRA, M. G.; MERCANTE, F. M. Fixação biológica de nitrogênio. In: AIDAR, H.; KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F. **Produção de feijoeiro comum em várzeas tropicais**. Embrapa Arroz e Feijão, p. 122-153, 2002.

SUBHASISH D.; RANGBAMON T.; BUDDHADEB D.; SATYA S. B.; KI-HYUN K. Assessing C–N balance and soil rejuvenation capacity of vermicompost application in a degraded landscape: A study in an alluvial river basin with *Cajanus cajan*. **Environmental Research**, v. 177, p. 1-10, 2019.

PANDEY, D.; AGRAWAL, M.; BOHRA, J.S. Effects of conventional tillage and no tillage permutations on extracellular soil enzyme activities and microbial biomass under rice cultivation. **Soil and Tillage Research**, v. 136, p. 51-60, 2014.

RASOOL, N.; RESHI, Z. A.; SHAH, M. A. Effect of butachlor (G) on soil enzyme activity. **Eurasian Journal of Soil Biology**, v. 61, p. 94-100, 2014.

TAÍZ, L.; ZIEGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. Artemed, 2017. 888 p.

TIMMERS, A. C. J.; AURIAC, M. C.; TRUCHET, G. Refined analysis of early symbiotic steps of the Rhizobium-Medicago interaction in relation with microtubular cytoskeleton rearrangements. **Development**, v. 126, p. 3617-3628, 1999.

VERGARA, C.; ARAÚJO, K. E. C. **Fixação biológica de nitrogênio: Da infecção à organogênese do nódulo**. Ponta Grossa: Atena, 2021, p. 1-92.

VIEIRA, R. F.; RAMOS, N. P. **Atividade enzimática e atividade microbiana em solo com quantidades variadas de palha de Cana-de-açúcar**. Jaguariúna: Convibra, 2019. p.1-10.

VIEIRA, R. F.; TSAI, S. M.; TEIXEIRA, M. A. Nodulação e fixação simbiótica de nitrogênio em feijoeiro com estirpes nativas de rizóbio, em solo tratado com lodo de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 10, p. 1047-1050, 2005.

VIERO, F.; BAYER, C.; VIEIRA, R. C. B.; CARNIEL, E. Management of irrigation and nitrogen fertilizers to reduce ammonia volatilization. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1737-1743, 2015.

WANG, C.; GUO, P.; HAN, G.; FENG, X.; ZHANG, P. TIA, N. X. Effect of simulated acid rain on the litter decomposition of *Quercus acutissima* and *Pinus massoniana* in forest soil microcosms and the relationship with soil enzyme activities. **Science of the Total Environment**, v. 408, p. 2706-2713, 2010.

4 ARTIGOS

4.1 Artigo 1 - Adubação nitrogenada e inoculação de *Rhizobium tropici* na resposta agrofisiológica de feijão-guandu

Este artigo foi elaborado conforme normas do *Journal of Plant Nutrition*

Adubação nitrogenada e inoculação de *Rhizobium tropici* e respostas agrofisiológicas do feijão-guandu

Resumo

O ambiente de cultivo associado a inoculação com bactérias fixadoras de nitrogênio intervém na expressão fenotípica do feijão-guandu. O objetivo deste estudo foi avaliar manejos de adubação e inoculação com *Rhizobium tropici* nas respostas agrofisiológicas de *Cajanus cajan* (L.) Millsp., cultivados em Nitossolo, em ambiente controlado. O ensaio foi conduzido em casa de vegetação em delineamento de blocos casualizados, em arranjo 3x5 (genótipos x manejos). Os genótipos cultivados foram BRS03, BRS04 e IAPAR 43 e os manejos de adubação e inoculação foram: i) Apenas adubação de base; ii) Adubação de base com nitrogênio e inoculante; iii) Adubação de base e nitrogênio; iv) Adubação base e inoculante; v) Controle - sem a aplicação de fertilizante ou inoculante. A adubação de base foi composta por micronutrientes e macronutrientes, com exceção do nitrogênio. A adubação nitrogenada foi realizada com Ureia P.A. Aos 21, 37 e 60 dias determinou-se a concentração interna de carbono, transpiração, condutância estomática, fotossíntese e clorofila a e b. No pleno florescimento, foi quantificado o número de dias para esse estágio e mensurado a altura, comprimento da raiz, número de nós, massa seca aérea e das raízes. Os dados agrofisiológicos foram submetidos a análise de variância e teste Tukey ($p < 0,05$). Para as respostas fisiológicas procedeu-se a análise de variância multivariada e das variáveis canônicas. Aos 60 dias após a emergência das plântulas, a média da taxa fotossintética líquida foi $8,17 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ para sem a aplicação de fertilizante ou inoculante e de $26,77 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ para adubação base e nitrogênio. As plantas que receberam a adubação base apresentaram maiores índices de clorofila e, conseqüentemente, maior fotossíntese, condutância estomática e transpiração. A análise canônica evidenciou alta correlação positiva entre a condutância estomática, fotossíntese e transpiração, enquanto a concentração interna de carbono foi negativa. A cultivar IAPAR43 floresceu aos 73 dias, BRS03 e BRS04 aos 169 e 171 dias, respectivamente. Esse comportamento influenciou na altura de plantas, no número de nós e no comprimento da raiz principal. Os genótipos BRS03 e BRS04 apresentaram maior produção de massa seca, demonstrando potencial para uso como adubos verdes. A aplicação de fertilizante nitrogenado, inoculante, ou a combinação de ambos têm efeito semelhante na expressão do potencial genotípico do feijão-guandu. Sendo assim, apenas o uso de inoculante pode suprir a demanda de nitrogênio para esta cultura.

Palavras-Chave: Análise canônica, *Cajanus cajan* (L.) Millsp, Condutância estomática, Clorofila a e b, Fotossíntese.

Introdução

Cajanus cajan (L.) Millsp., conhecido popularmente como feijão-guandu, andu ou bóer, tem se destacado no cenário agrícola internacional, nacional e regional, pois apresenta bom crescimento em condições de restrição hídrica (Liu *et al.*, 2021), em solos compactados (Araújo *et al.*, 2020), redução da população de nematoides (Moreira *et al.*, 2015; Gardiano *et al.*, 2014), uso medicinal (Sinan *et al.*, 2021) e interessante constituição nutricional para nutrição humana e animal (Luo *et al.*, 2021; Buthelezi *et al.*, 2019).

O feijão-guandu é amplamente utilizado como adubo verde, com potencial produtivo de 6,5 a 9,5 t ha⁻¹ de massa seca na parte aérea (FERNANDES; BARRETO; EMÍDIO FILHO, 1999) e produtividade de 14,32 kg ha⁻¹ aos 8 meses (SOUZA *et al.*, 1999). Possui um porte arbustivo ereto, com a altura variando entre 2 e 3 m e um ciclo de vida de 3 a 4 anos. A espécie tem rápido crescimento, cobrindo o solo e aumentando a biomassa no estágio inicial, importante papel na adubação, e tem ciclo de vida curta, o que dificultaria, ao menos hipoteticamente, a competição com espécies invasoras.

Resultados de pesquisa evidenciam a importância e eficiência do feijão-guandu em proporcionar benefícios nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo. Alvarenga *et al.* (1995), avaliando características de adubos verdes para conservação e recuperação de solos em Viçosa-MG, encontraram resultados que indicam a eficiência do feijão-guandu como a espécie de maior potencial em recuperação de solos em relação às demais utilizadas. Como adubo verde, essa leguminosa apresentou um potencial produtivo de 6,5 a 9,5 t ha⁻¹ de massa seca na parte aérea (Fernandes *et al.*, 1999). Solos do Cerrado são ácidos, de baixa fertilidade natural, reduzida atividade microbiológica e baixos teores de matéria orgânica, sendo necessário o manejo adequado e incorporação de resíduos orgânicos. Assim, o uso de adubos verdes é uma alternativa viável para a construção da qualidade e fertilidade do solo. O nitrogênio é um elemento limitante para a produção vegetal, principalmente em solos tropicais, pois devido as condições edafoclimáticas dessas regiões o estoque de nitrogênio é insuficiente para suprir a demanda das culturas, dessa forma, faz-se necessário uma adubação inicial de nitrogênio mineral nas culturas utilizadas na adubação verde, pois além de sua essencialidade para o desenvolvimento vegetal, é o elemento responsável por maiores produções de biomassa.

Outra forma de suprir a demanda de nitrogênio pelas espécies leguminosas é por meio da fixação biológica de nitrogênio (FBN), com a prática da inoculação. Carvalho *et al.* (1999), estudando a produção de algumas espécies de leguminosas para adubação verde, verificaram acúmulo de 229 kg ha⁻¹ de N, sendo que 73% desse acúmulo foi proveniente do processo de FBN. Moreira *et al.* (2003) observaram que, em média, 61% do N acumulado pelo guandu-anão proviam da FBN. Freitas *et al.* (2011), avaliando a ocorrência de nodulação e fixação biológica de algumas leguminosas com potencial forrageiro, verificaram que, em alguns casos, a contribuição desse processo foi de 85%.

Além desses aspectos, destaca-se como uma cultura-chave no combate à fome no mundo, pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura-FAO. Essa organização, em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, desenvolvem o Programa de Biofortificação de Produtos Agrícolas para Melhoria da Nutrição Humana, a fim de torná-los alimentos básicos ricos em micronutrientes, principalmente para pessoas de baixo poder econômico e social (FAO, 2021).

A expressão fenotípica das respostas fisiológicas e dos caracteres agrônômicos da planta varia de acordo com o genótipo, o ambiente ou a interação genótipo-ambiente (Borém e Miranda, 2013). A

determinação da adubação ideal é um dos fatores que pode contribuir para a máxima expressão do potencial do genótipo da cultura agrícola. Alvarenga et al. (1995), testando vários tipos de adubos verdes, entre eles o feijão-guandu, em um Podzólico Vermelho-Amarelo em Viçosa-MG, verificaram que essa leguminosa apresentou o maior potencial para penetração de raízes no solo, produção de biomassa aérea e imobilização de nutrientes. Muitos pesquisadores observaram o desenvolvimento radicular do feijão-guandu e, pelas características encontradas, afirmam que a profundidade e a ramificação do mesmo o tornam capaz de resistir ao estresse hídrico e possibilita romper camadas adensadas e/ou compactadas do solo, sendo considerado um arado biológico (Santos et al., 1999; Alcântara et al., 2000). No estudo desenvolvido por Arihara et al. (1991), os autores puderam verificar que os canais deixados na camada após a decomposição das raízes dessa planta, possibilitaram melhor enraizamento na cultura da soja e do milho.

O feijão-guandu é tido na literatura como uma cultura que apresenta “rusticidade”, isto é, consegue manter sua produção mesmo em condições adversas, seja de nutrientes ou restrição hídrica (Sinha et al., 2020). Apesar desse estereótipo, estudos científicos sugerem que os ganhos em rendimentos podem ser potencializados em decorrência da associação simbiótica dessa leguminosa com microrganismos do gênero *Bradyrhizobium* (Arya et al., 2020; Sharma et al., 2017; Garg e Pandey, 2016; Araújo et al., 2015).

Baseando-se na hipótese de que o fornecimento de fertilizante nitrogenado, associado à inoculação com bactérias fixadoras de nitrogênio, aumenta a eficiência fotossintética das culturas, o objetivo deste estudo foi avaliar as respostas agrofisiológicas de *Cajanus cajan* (L.) Millsp sob diferentes manejos de adubação nitrogenada e inoculação com *Rhizobium tropici*.

Material e Métodos

O ensaio foi conduzido em condição experimental protegida (casa de vegetação) na Fazenda Experimental Hamilton de Abreu Navarro, localizada no município de Montes Claros-MG, Brasil, sob coordenadas 16°40'58,5"S, 43°50'25,6"W e 626 m de altitude. O clima dessa região é o tropical de savana (Aw), caracterizado por invernos secos amenos e verões chuvosos e temperaturas altas, pela classificação de Koppen (Alvares et al., 2013). A temperatura média e a umidade relativa do ar dentro da casa de vegetação referem-se as médias diárias, obtidas a cada dez dias, durante a condução do experimento (Figura 1).

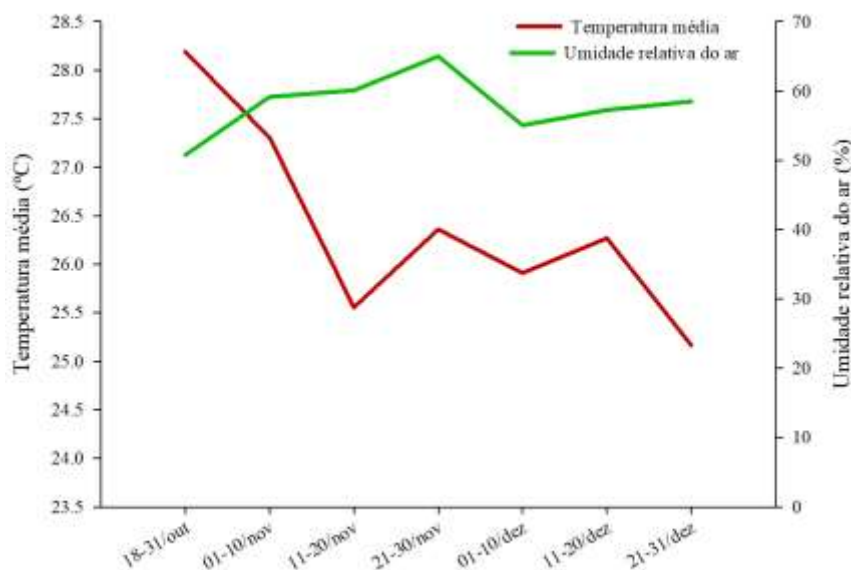


Figura 1. Temperatura média e umidade relativa do ar dentro da casa de vegetação, durante a condução do experimento, ano agrícola 2019/2020, em Montes Claros-MG.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com 3 repetições, em esquema fatorial 3x5, sendo que o primeiro fator se refere aos genótipos de feijão-guandu (BRS03, BRS04 e IAPAR 43) e o segundo, ao manejo de adubação mineral combinado com inoculação, sendo eles: 1- Adubação base; 2- Adubação base + Nitrogênio + Inoculante; 3- Adubação base + Nitrogênio; 4- Adubação base + Inoculante; 5- Controle - sem adubação base, Nitrogênio + Inoculante. Entende-se por “Adubação base”, a composição dotada de micronutrientes (Fe^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+}) e macronutrientes (PO_4^{2-} , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e SO_4^{2-}), adaptada da recomendação para plantas cultivadas em vasos, em ambientes controlados, proposto por Cantarutti *et al.* (2007).

A semeadura do feijão-guandu foi realizada com três sementes por vaso. Após a germinação, manteve-se somente uma planta por vaso, com umidade próxima a capacidade de campo. As parcelas experimentais foram constituídas por uma planta vaso, contendo 10 kg de solo. O solo utilizado para o preenchimento desses vasos foi coletado na Fazenda Experimental da UFMG, classificado como Nitossolo (WRB/FAO, 2015), com as seguintes características químicas: pH (água) = 4,5; P = 1,51 mg dm^{-3} ; K^+ = 20,69 mg dm^{-3} ; Ca^{+2} = 2,50 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Mg^{+2} = 1,00 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Al^{3+} = 1,34 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; H+Al = 9,62 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; CTC efetiva. A semeadura do feijão-guandu foi realizada com três sementes por vaso. Após a germinação manteve-se somente uma planta por vaso, com umidade próxima a capacidade de campo = 5,13 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; saturação por base = 28%, matéria orgânica = 4,41 dag kg^{-1} e textura argilosa.

Como o solo apresentava pH baixo, foi realizada a calagem com corretivo contendo 60% de CaO_2 e 30% de MgO_2 e PRNT de 180%, com objetivo de elevar a saturação por bases até 60%. A semeadura do feijão-guandu foi realizada com três sementes por vaso. Após a germinação manteve-se somente uma planta por vaso, com umidade próxima a capacidade de campo. Após esse período, foi realizada a adubação base com reagentes P.A. para plantas cultivadas em vasos em ambientes controlados (Cantarutti *et al.*, 2007), com exceção do nitrogênio.

Tabela 1. Nutrientes, concentrações requeridas, fontes e quantidades utilizadas para adubação básica de um solo.

Nutriente	Concentração	Fonte ¹	Fonte/L solução ²
N	100,00	NH ₄ H ₂ PO ₄	24,64 g
P	300,00	NH ₄ H ₂ PO ₄	-
		KH ₂ PO ₄	-
		KH ₂ PO ₄	10,39 g
K	150,00	KH ₂ PO ₄	-
		K ₂ SO ₄	3,37 g
S	40,00	Na ₂ SO ₄	2,22 g
			-
		CuSO ₄ .5H ₂ O	-
		ZnSO ₄ .7 H ₂ O	-
B	0,81	H ₃ BO ₃	139,00 mg
Cu	1,33	CuSO ₄ .5H ₂ O	185,00 mg
Fe	1,55	FeCl ₃ .6H ₂ O	225,10 mg
Mn	3,66	MnCl ₂ .4H ₂ O	395,50 mg
Mo	0,15	NaMoO ₄ .2H ₂ O	10,30 mg
Zn	4,00	ZnSO ₄ .7H ₂ O	527,90 mg

Reagente PA. ²Aplicar 100 mL da solução para cada subamostra de 3 kg de solo.

Fonte: Cantarutti *et al.* (2007).

O fornecimento de nitrogênio (ureia PA) e a aplicação de inoculante ocorreu somente nas unidades experimentais nas quais foram avaliados esse (s) efeito (s), sendo que a adição de ureia PA ocorreu aos 20 dias após a emergência das plântulas (adubação de cobertura). Em relação a inoculação, as sementes foram tratadas na pré-semeadura com inoculante comercial que apresentava em sua composição *Rhizobium tropici*, contendo as estirpes Semia 4077, Semia 4080 e Semia 4088, vitaminas, sais minerais, fonte de carbono, turfa (pó), água, espessante, conservante e estabilizante PVP (aquoso), com $3,0 \times 10^9$ células viáveis por mL g⁻¹, na dose de 100 mL g⁻¹ para 25 kg de sementes (Nitro1000, 2019).

Foram avaliadas as respostas fisiológicas relacionadas a fotossíntese - Concentração interna de carbono (Ci - $\mu\text{mol mol}^{-1}$); Taxa transpiratória (E - $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$); Condutância estomática (gs - $\text{mol m}^{-1} \text{s}^{-1}$) e; Taxa fotossintética líquida (A - $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), aos 21, 37 e 60 dias após a emergência das plântulas, com auxílio do analisador portátil de gás infravermelho (IRGA Lcpro-SD), com intensidade luminosa artificial de $1.000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. As trocas gasosas foram medidas entre às 7 e 9 horas, numa folha fisiologicamente madura, no terço médio do limbo foliar. Os índices de clorofila a (cla) e clorofila b (clb) foram avaliados na mesma localização já mencionada, com o auxílio de equipamento portátil ClorofiLOG CFL1030, expressos pelo índice SPAD.

As características agrônômicas (número de dias decorridos para a floração, altura de plantas, comprimento da raiz principal, número de nós na haste principal, massa seca aérea e massa seca de

raízes principal e secundárias) foram determinados no pleno florescimento, com auxílio de uma trena graduada e uma balança eletrônica semi-analítica.

Os dados fisiológicos e agrônômicos foram submetidos a análise de variância pelo teste F e, quando observadas diferenças entre os tratamentos para as características, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Também foi aplicada a análise de variância multivariada (MANOVA), com o objetivo de verificar o agrupamento das diferentes respostas fisiológicas das plantas e os tratamentos testados, em cada período. Para tanto, foi utilizada a função MANOVA do pacote “stats”, recorrendo ao teste de Pillai ($p < 0,05$). A análise de variáveis canônicas foi realizada utilizando-se o pacote “candisc” (Friendly e Fox, 2021). Todas as análises estatísticas foram realizadas com auxílio do Software R (R Core Team [R], 2021).

Resultados e Discussão

Características fisiológicas

Não foi observado interações genótipos por manejos (GxM) entre as características fisiológicas avaliadas. Aos 21 DAE constatou-se predominantemente o efeito dos genótipos para as características taxa transpiratória (E), condutância estomática (gs), taxa fotossintética líquida (A), clorofila A (cla) e clorofila B (clb). Já os efeitos do manejo de adubação e inoculação foram observados em todas as épocas de avaliação (21, 37 e 60 DAE) para concentração interna de carbono (Ci), taxa transpiratória (E), condutância estomática (gs) e taxa fotossintética líquida (A) (Tabela 2). Resultado semelhante foi observado em outros estudos (Mansour et al., 2021; Soureshjani et al., 2019) e pode ser atribuído as avaliações realizadas em diferentes estádios fenológicos da planta.

Tabela 2. Resumo da análise de variância das respostas fisiológicas do feijão-guandu, cultivados em Nitossolo, ano agrícola 2019/2020, em Montes Claros-MG.

DAE	FV	Quadrados médios					
		Ci	E	Gs	A	cla	clb
		$\mu\text{mol mol}^{-1}$	$\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}$ s^{-1}	mol m^{-1} s^{-1}	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$		
21	Genótipo (G)	2992,57	1,57*	0,01*	48,62*	21,29*	15,97*
	Manejo (M)	15984,23*	4,05*	0,02*	256,35*	1,26	1,41
	GxM	635,46	0,26	0,003	4,06	2,91	0,70
	Resíduo	1160,92	0,49	0,003	13,41	1,67	0,96
	CV (%)	14,23	24,52	30,88	31,34	3,77	10,94
37	Genótipo (G)	301,06	0,01	0,002	0,96	3,62	0,64
	Manejo (M)	24775,52*	8,11*	0,09*	578,75*	85,51*	30,18*
	GxM	2525,60	1,07	0,01	47,55	15,43	3,68
	Resíduo	1449,66	1,20	0,01	35,31	16,03	5,98
	CV (%)	14,80	29,39	39,87	34,15	11,47	20,02
60	Genótipo (G)	243,15	0,23	0,01	70,32	22,42*	65,69*
	Manejo (M)	10997,25*	0,80	0,02	459,89*	35,47*	56,85*
	GxM	2659,83	0,71	0,02	74,24	8,67	16,14

Resíduo	3335,74	0,73	0,02	42,55	5,96	10,67
CV (%)	23,54	24,41	45,36	36,67	6,56	20,89

*significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste F, respectivamente. DAE: dias decorridos da emergência ao pleno florescimento. CV: Coeficiente de variação. Ci: concentração interna de CO₂; E: taxa transpiratória; gs: condutância estomática; A: taxa fotossintética líquida; cla: clorofila A; clb: clorofila B.

Em relação ao efeito do genótipo, os acessos BRS03 e BRS04 apresentaram maiores índices cla e clb e, conseqüentemente, maior A, aos 21 dias de cultivo. Aos 60 dias, esses mesmos genótipos apresentaram médias de cla (BRS03: 36,39; BRS04: 36,64) e A (BRS03: 16,80 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; BRS04: 16,30 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) bem próximos a cultivar IAPAR 43 (cla: 38,62; A: 20,27 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (Tabela 3). Os dados encontrados corroboram os de Guimarães et al. (2016), em estudo conduzido com a cultivar BRS Mandarin em Rondonópolis-MT, já que esses pesquisadores verificaram índice SPAD variando entre 37,45 e 49,00 aos 30 dias após a emergência das plantas.

Tabela 3. Respostas fisiológicas do feijão-gandu aos 21 e 60 dias de cultivo em Nitossolo, ano agrícola 2019/2020, em Montes Claros-MG.

DAE	Genótipos	E ¹	gs ¹	A ¹	cla ¹	clb ¹
		mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹	mol m ⁻¹ s ⁻¹	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$		
21	BRS03	3,22 a	0,14 b	13,20 a	35,12 a	9,56 a
	BRS04	2,79 ab	0,16 ab	12,15 ab	34,76 a	9,60 a
	IAPAR 43	2,58 b	0,20 a	9,69 b	32,90 b	7,79 b
60	BRS03	3,62 a	0,35 a	16,80 a	36,39 b	14,60 b
	BRS04	3,52 a	0,33 a	16,30 a	36,64 ab	14,27 b
	IAPAR 43	3,38 a	0,30 a	20,27 a	38,62 a	18,05 a

¹Médias seguidas por mesma letra na coluna não diferem entre si, pelo teste de Tukey, considerando cada período ($p < 0,05$). DAE: dias decorridos da emergência. E: taxa transpiratória; gs: condutância estomática; A: taxa fotossintética líquida; cla: clorofila A; clb: clorofila B.

Quanto ao manejo de adubação e inoculação, constatou-se que os tratamentos com presença da adubação base, isto é, micronutrientes e macronutrientes, com exceção do N, foram aqueles que apresentaram maiores valores relacionados as respostas fisiológicas estudadas e, por conseguinte, maior crescimento, desenvolvimento e acréscimos de produção vegetal. Tomando como exemplo a A (Figura 2), aos 60 DAE, a média de assimilação de CO₂ na ausência de adubação e inoculação foi de 8,17 $\mu\text{mol CO}_2$ por $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, enquanto, as plantas que receberam a suplementação base acrescida de nitrogênio foi na ordem de 26,77 $\mu\text{mol CO}_2$ por $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Esse resultado pode ser atribuído à demanda dos elementos essenciais, para realização de reações fisiológicas, metabólicas e bioquímicas da planta (Souza et al., 2018). Uma aplicação prática dessa interligação é a função desempenhada pelo N. Esse elemento, em maior concentração nos tecidos vegetais, é constituinte de moléculas de clorofila, de proteínas - aminoácidos e enzimas (Taiz et al., 2017). A baixa disponibilidade ou ausência de N pode interferir nas

fases fotoquímica (cadeia transportadora de elétrons) e química (fixação de CO₂) do processo fotossintético. Além disso, a sua ausência pode desequilibrar a relação com outros nutrientes, como por exemplo, o sinergismo entre o N e P, que impacta no desenvolvimento inicial das plantas, no metabolismo de N (processo de fixação biológica), na alcalinização ou acidificação do pH da rizosfera.

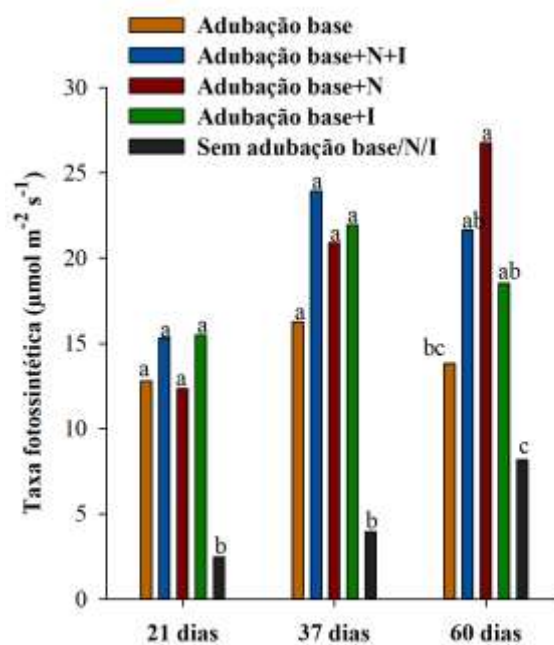


Figura 2. Taxa fotossintética líquida do feijão-guandu em diferentes manejos de adubação e inoculação em Nitossolo, ano agrícola 2019/2020, em Montes Claros-MG. Médias seguidas pela mesma letra, em cada época, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os tratamentos com adubação base (AB; AB+N+I; AB+N e AB+I) também contribuíram com maiores valores de *cl*, *clb*, *gs* e *E* (Figura 3).

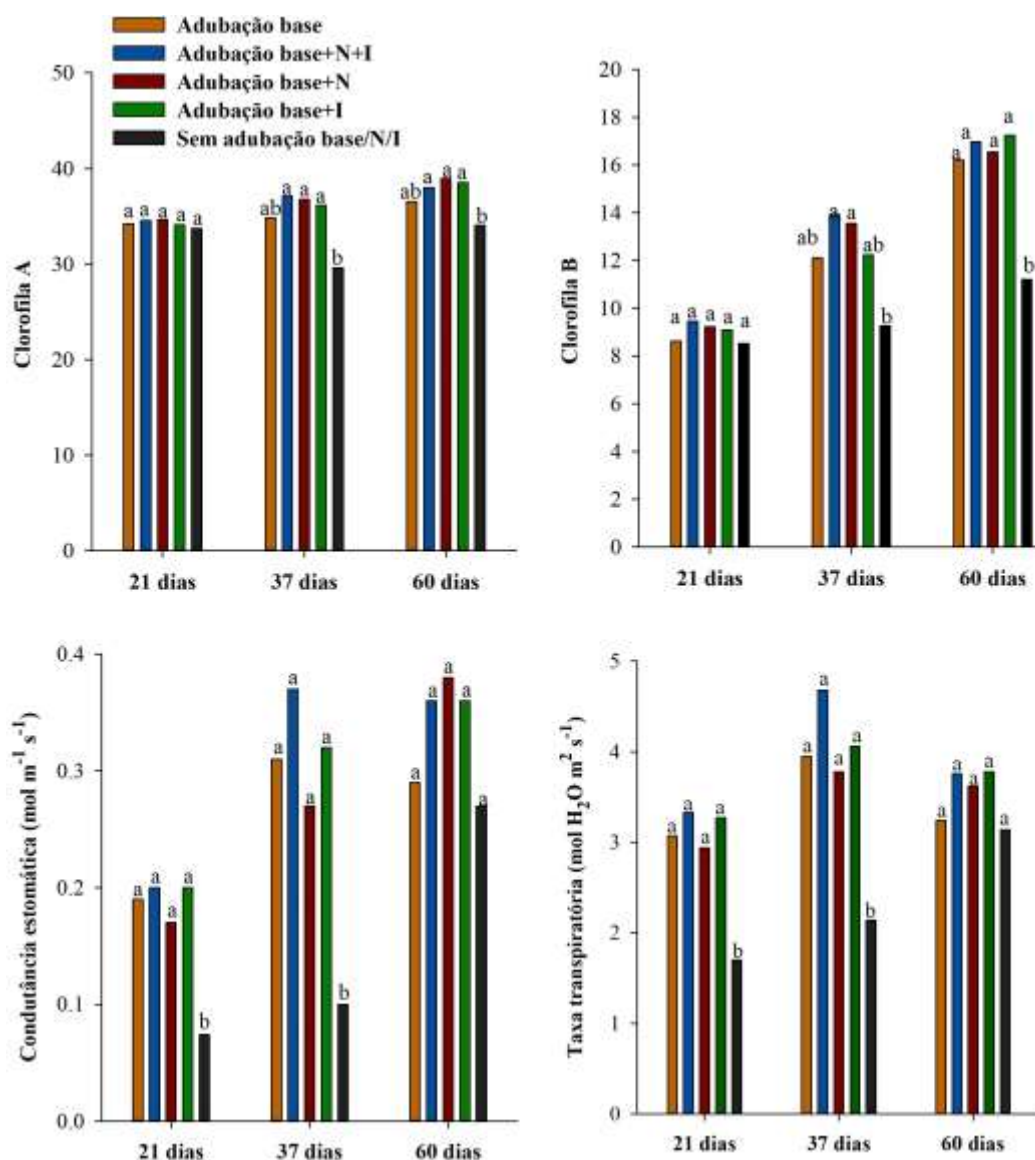


Figura 3. Clorofila A, clorofila B, condutância estomática e taxa transpiratória do feijão-gandu em diferentes manejos de adubação e inoculação em Nitossolo, ano agrícola 2019/2020, em Montes Claros-MG. Médias seguidas pela mesma letra, em cada época, não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

As plantas de feijão-gandu apresentaram uma tendência de acréscimos de produção de pigmentos fotossintéticos ao longo do tempo, entre os diferentes manejos (Figura 3). Esse incremento, possivelmente, foi propiciado pela expansão do limbo foliar e/ou estágio de desenvolvimento da planta e contribuíram para maior assimilação de CO₂, com maiores valores de condutância estomática e perda d'água em forma de vapor. Resultados semelhantes foram encontrados em outros estudos com o feijoeiro, em ambientes controlados, como Wang *et al.* (2018), que verificaram o efeito de diferentes pontos de carbono sobre o crescimento e a taxa fotossintética das plantas, e Kakuszi *et al.* (2016), que identificaram um aparato fotossintético ativo em regiões hipocótilas de feijão sob o solo.

A análise de variância multivariada canônica foi significativa ($p < 0,05$) para a interação dos genótipos com os manejos de adubação e inoculação (GxM) (Figura 4).

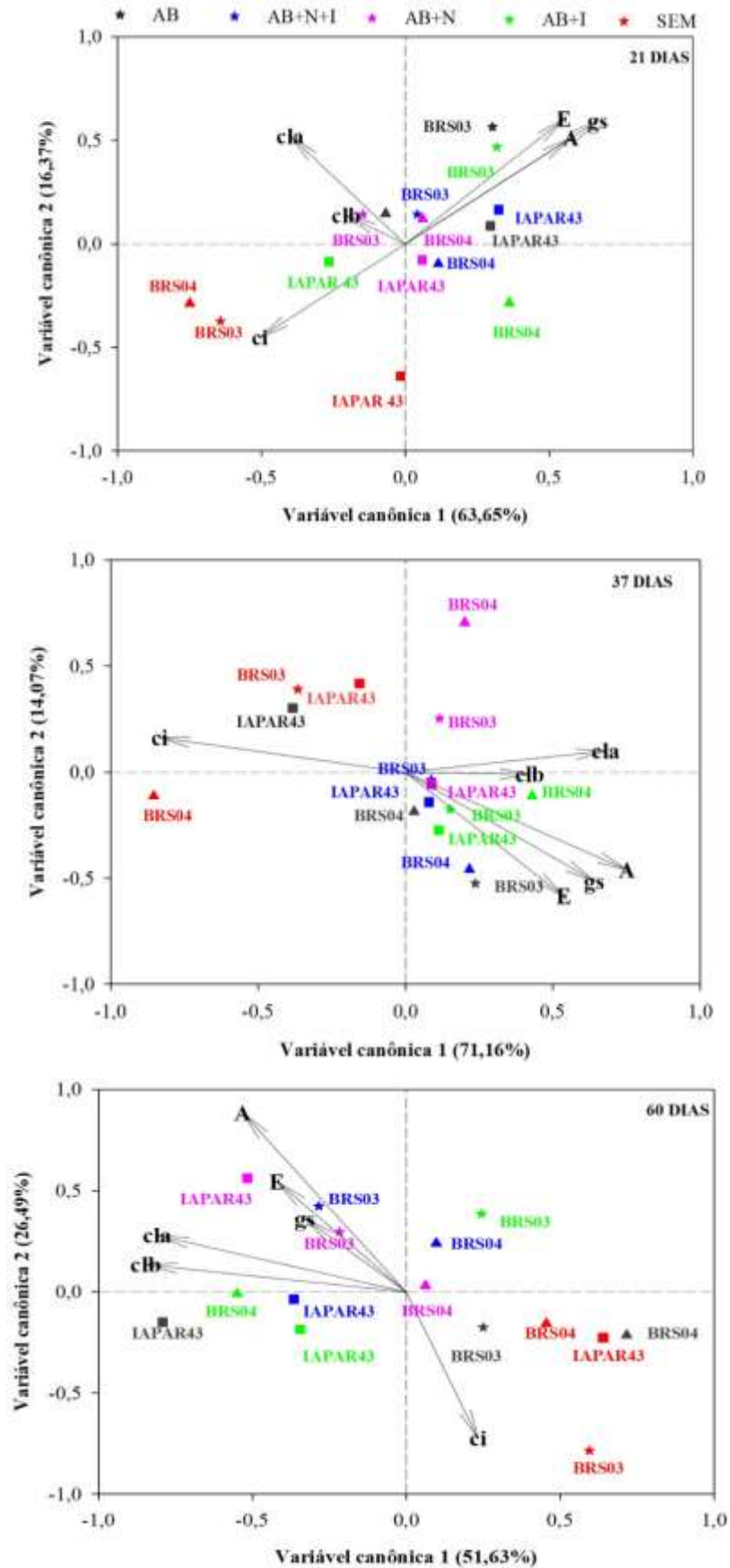


Figura 4. Escores canônicos padronizados para variáveis canônicas VC1 e VC2 aos 21, 37 e 60 dias de emergência das plântulas de três genótipos de feijão-gandu, submetidos a cinco manejos de adubação e inoculação, em Montes Claros-MG. Ci: concentração interna de CO₂ (μmol mol⁻¹); E: taxa transpiratória

(mol H₂O m⁻² s⁻¹); gs: condutância estomática (mol m⁻¹ s⁻¹); A: taxa fotossintética líquida (μmol m⁻² s⁻¹); cla: clorofila A; clb: clorofila B.

A relação GxM indica que esses fatores atuam concomitantemente na determinação das características fisiológicas, nos três estádios fenológicos avaliados. Nos três períodos de avaliação observou-se que as características A, E e gs apresentaram alta correlação positiva, enquanto Ci de CO₂ apresentou correlação negativa. De acordo com Taiz et al. (2017), os menores valores de Ci ocorreram devido a maior incorporação do CO₂ por meio da carboxilação para formação de compostos orgânicos. Essa associação também indica que houve ausência de estresse fisiológico na planta e, que ao longo do tempo, com a expansão do limbo foliar, houve maior eficiência do uso de radiação e maior taxa fotossintética líquida e taxa transpiratória. Essa relação também foi mencionada em estudos com feijão-vagem avaliando a resposta ao nitrogênio (Yuan *et al.*, 2017).

Características agrônômicas no pleno florescimento

Verificou-se, no pleno florescimento, a interação GxM para MSR ($p < 0,05$). O efeito do genótipo foi observado na maioria das características avaliadas e o do manejo de adubação e inoculação para a variável NDF (Tabela 4).

Tabela 4. Resumo da análise de variância das características agrônômicas do feijão-guandu no pleno florescimento, cultivados em diferentes manejos de adubação e inoculação em Nitossolo, ano agrícola 2019/2020, Montes Claros-MG.

FV	NDF	ALP	CRP	NNP	MSA	MSR
Genótipo (G)	46857,87*	9328,95*	2469,75*	1869,09*	929,05*	49,94
Manejo (M)	3347,47*	1204,52	226,25	205,55	105,88	36,05
GxM	4702,27	334,45	308,09	114,59	142,66	14,91*
Resíduo	7699,73	661,69	575,35	79,63	95,22	6,27
CV (%)	12,05	18,83	50,49	21,53	31,09	30,31

*significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste F. FV: Fonte de variação; CV (%): coeficiente de variação; NDF: número de dias para o florescimento; ALP: altura de plantas; CRP: Comprimento da raiz principal; NNP: número de nós na haste principal; MSA: massa seca aérea (folhas e caule); MSR: massa seca radicular.

Considerando o efeito do manejo de adubação e inoculação no florescimento do feijão-guandu, as plantas que receberam alguma complementação de nutrientes demandaram 125 a 138 dias para esse estágio fenológico, já as plantas cultivadas sem adubação e inoculação demandaram 152 dias (Tabela 5). A combinação da adubação base com a inoculação na pré-semeadura ou a adição de nitrogênio mineral propiciou o mesmo tempo para floração das plantas (138 dias), demonstrando assim, a importância do N, independentemente da fonte utilizada.

Tabela 5. Efeito do genótipo e do manejo de adubação e inoculação no pleno florescimento do feijão-guandu, ano agrícola 2019/2020, em Montes Claros-MG.

Manejos de adubação e inoculação	Floração (dias) ¹
Adubação base	135 ab
Adubação base + N+ I	125 b
Adubação base + N	138 ab
Adubação base + I	138 ab
Sem adubação e inoculação	152 a
Genótipos	
BRS03	169,00 a
BRS04	170,00 a
IAPAR 43	73,00 b

¹Médias seguidas por mesma letra na coluna, na mesma sessão de efeito de variação, não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A cultivar IAPAR 43 apresentou menor tempo para o estágio de florescimento, com média de 73 dias decorridos da emergência a floração. Já os acessos BRS03 e BRS04 floresceram aos 169 e 170 dias, respectivamente (Tabela 5). Essa redução do ciclo resultou na diminuição da ALP no NNF, no CRP e na MSA da IAPAR 43 (Tabela 6). Esse resultado relaciona-se ao redirecionamento de fotoassimilados para a fase reprodutiva, em detrimento ao crescimento da planta (Raven et al., 2014). Além disso, essa variação pode ter relação com a concentração de clorofilas e estruturas anatômicas (espessura do parênquima clorofiliano, densidade e tamanho dos estômatos ou mesmo índice estomático) de cada genótipo. A menor duração do ciclo dessa cultivar, possivelmente, foi obtida via melhoramento genético, já que é voltada para uso comercial, demandando assim menor tempo até a colheita, com menor exposição a pragas e doenças.

Tabela 6. Características agronômicas de feijão-guandu, determinadas no florescimento, ano agrícola 2019/2020, em Montes Claros-MG.

Genótipos	NNF	MSA ¹	ALP	CRP
		g	----- cm -----	
BRS03	57,80 a	26,43 a	151,87 a	49,93 a
BRS04	51,60 ab	26,51 a	150,07 a	45,60 a
IAPAR 43	33,13 b	12,60 b	107,80 b	28,80 b

¹Médias seguidas por mesma letra na coluna não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). NNF: número de nós na haste principal; MSA: massa seca aérea (folhas e caule); ALP: altura de plantas; CRP: comprimento da raiz principal.

Apesar do mercado preferir genótipos de ciclo de curta duração, os acessos BRS03 e BRS04 podem ser interessantes para produção de biomassa (Letty et al., 2021) e conservação do solo (Saxena et al., 2021), uma vez que demandam maior tempo para florescer e possuem alto crescimento vegetativo. Adicionalmente, as maiores médias de massa seca aérea desses genótipos (BRS03: 26,43 g; BRS04:

26,51 g) confirmam a relação existente com os parâmetros fisiológicos (Tabela 3). Essa correlação entre crescimento/biomassa e os índices de pigmentos fotossintéticos, taxa fotossintética líquida e taxa de transpiração já foi mencionada também em outros estudos (Mansour et al., 2021; Sreeharsha et al., 2015). Segundo Guimarães et al. (2016), o adubo verde dessa leguminosa contribui para melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, devido a alta capacidade de produção de biomassa.

Sreeharsha et al. (2015) afirmam que a sinalização para o florescimento mais tardiamente acarreta mobilização do excesso de açúcares solúveis para sumidouros, nódulos e raízes. Este estudo científico verificou esse redirecionamento de solutos para o desenvolvimento do sistema radicular, constatado pelos dados estatísticos dos genótipos BRS03 e BRS04 (Tabela 7). Considerando apenas o efeito do manejo no florescimento, os registros fotográficos da cultivar IAPAR 43 demonstraram que há também esse efeito nas raízes do tratamento sem adubação e inoculação (152 dias para o florescimento) (Figura 5).

Tabela 7. Interação GxM da massa seca radicular de feijão-guandu IAPAR 43, sob diferentes manejos de adubação e inoculação, em Montes Claros-MG.

Genótipos (G)	Manejos de adubação mineral e inoculação (M)				
	Base ¹	Base+N+I ¹	Base + N ¹	Base + I ¹	Sem base/I ¹
BRS03	8,66 aA	9,08 aA	11,69 abA	13,81 aA	5,62 aA
BRS04	6,56 Aa	8,56 aA	14,66 aA	7,74 bA	6,38 aA
IAPAR 43	5,62 aA	5,24 aA	7,21 bA	6,45 bA	6,64 aA

¹Médias seguidas por mesma letra na coluna não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

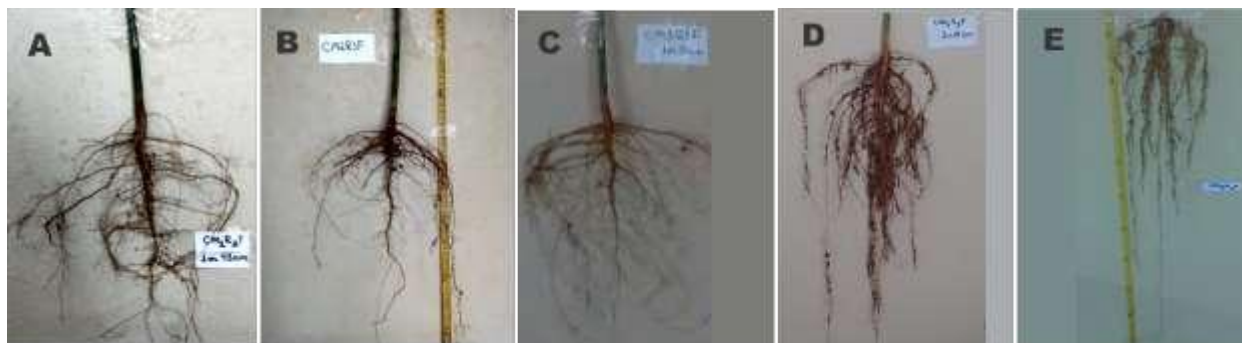


Figura 5. Comportamento radicular da cultivar IAPAR 43, no pleno florescimento, em diferentes combinações de manejo de adubação mineral e inoculação pré-semeadura. A- Adubação base; B- Adubação base + Nitrogênio + Inoculante; C- Adubação base + Nitrogênio; D- Adubação base + Inoculante; E- Sem adubação base, nitrogênio e inoculante.

O comportamento desta variável mais uma vez corrobora a necessidade de estudos complementares, a fim de compreender melhor a influência do ambiente, sob a morfologia e fisiologia do feijão-guandu, não somente no redirecionamento dos açúcares para o sistema radicular, mas também o mecanismo utilizado ao longo de todo o ciclo da cultura.

Conclusões

Os tratamentos com adubação de base proporcionam maiores valores de respostas agrofisiológicas

para as características clorofila a e b, taxa fotossintética líquida, altura de plantas e massa seca radicular, demonstrando que o potencial de produção do feijão-guandu é aumentado quando há o manejo de adubação.

Os genótipos BRS03 e BRS04 apresentaram maior produção de massa seca, demonstrando potencial para uso como adubos verdes.

A aplicação de fertilizante nitrogenado, inoculante, ou a combinação de ambos têm efeito semelhante na expressão do potencial genotípico do feijão-guandu. Sendo assim, apenas o uso de inoculante pode suprir a demanda de nitrogênio para esta cultura.

Referências

- Alcântara, F. A.; Furtini Neto, A. E.; Paula, M. B.; Mesquita, H. A.; Muniz, J. A. (2000). Adubação verde na recuperação da fertilidade de um Latossolo Vermelho-Escuro degradado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 35, n. 2, p. 277-288.
- Alvarenga, R. C.; Costa, L. M.; Moura Filho, W.; Regazzi, A. J. (1995). Características de alguns adubos verde de interesse para a conservação e recuperação de solos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 30, n. 2, p. 175-185.
- Arihara, J.; Ae, N.; Okada, K. (1991). Phosphorus nutrientions of grain legumes in the semi-arid tropcs. *Patancheru: ICRISAT*, p.183-1994.
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M., Sparovek, G. (2013). Köppen's Climate Classification Map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22, 711-728.
- Araújo, J., Alcântara, C. A. D., Velázquez E., Urbano, B., González-André, F. (2015). Bradyrhizobium yuanmingense related strains form nitrogen-fixing symbiosis with *Cajanus cajan* L. in Dominican Republic and are efficient biofertilizers to replace N fertilization. *Scientia Horticulturae*, 192, 421–428.
- Araújo, J., Alcântara, C. A. D., Velázquez E., Urbano, B., González-André, F. (2020). Inoculation with native *Bradyrhizobium* strains formulated with biochar as carrier improves the performance of pigeonpea (*Cajanus cajan* L.). *European Journal of Agronomy*, 113, 125985.
- Arya, R., Pandey, C., Dheeman, S., Aeron, A., Dubey, R. C., Maheshwari, D., Parvaiz, L. C., Ahmad, P., Bajpai, V. K. (2020). Fertilizer adaptive bacteria *Acidovorax valerianellae* and *Sinorhizobium fredii* in integrated nutrient management of pigeon pea (*Cajanus cajan* L.). *South African Journal of Botany*, 134, 84-90.
- Asnake, W., Mwambi, H., Temesgen, Z., Girma, T. (2013). Efeitos principais aditivos e modelo de interação multiplicativa (AMMI) e efeito principal de genótipo e análise biplot de interação genótipo por ambiente (GGE) de ensaios de variedade de trigo multiambientais. *African Journal of Agricultural Research*. 8, 1033-1040.
- Borém, A. and Miranda, G. V. (2013). Interação genótipo x ambiente. *Melhoramento de Plantas* (6. ed., UFV, 2013, p.131-144).
- Buthelezi, L. S., Mupangwa, J. F., Muchenje, V., Nherera-Chokuda, F. V. (2019). Influence of drying technique on chemical composition and ruminal degradability of subtropical *Cajanus cajan* L. *Animal Nutrition*, 5, 95-100.
- Carvalho, A. M.; Marília, L. B.; João, P.; Manoel, A. S. Manejo de Adubos Vedes no Cerrado. EMBRAPA, Planaltina, nº 4, p 1-28, 1999. Circular Técnico.

- Cantarutti, R. B., Barros, N. F., Martinez, H. E., Novais, R. F. (2007). Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: Novais et al. Fertilidade do solo. Editora UFV, 1017.
- Fernandes, M. F.; Barreto, A.C.; Emídio Filho, J. Fitomassa de adubos verdes e controle de plantas daninhas em diferentes densidades populacionais de leguminosas. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.34, n.9, p.1593-1600, 1999.
- Freitas, A. D. S.; Silva, T. O.; Menezes, R. S. C.; Sampaio, E. V. S.; Araújo, E. R.; Fraga, V. S. Nodulação e fixação de nitrogênio por forrageiras da caatinga cultivadas em solos do semiárido paraibano. Bras. Zootec., v.40, n.9, p.1856-1861, 2011.
- Friendly, M. and Fox, J. (2021). Candisc: visualizing generalized canonical discriminant and canonical correlation analysis (Version R package version 0.8-5). <http://CRAN.R-project.org/package=candisc>.
- Gardiano, C. G., Krzyzanowski, A. A., Abi S.O. J. G. (2014). Eficiência de espécies de adubos verdes sobre a população do nematoide reniforme. Semina Ciências Agrárias, 35, 719-726.
- Garg, N. and Pandey, R. (2016). High effectiveness of exotic arbuscular mycorrhizal fungi is reflected in improved rhizobial symbiosis and trehalose turnover in *Cajanus cajan* genotypes grown under salinity stress. Fungal Ecology, 21, 57-67.
- Gelete, S. G., Mekbib, F., Fenta, B. A., Teamir, M. (2021). Genotype-by-environment interaction on canning and cooking quality of advanced large-seeded common bean genotypes. Heliyon 7, 1-9.
- Guimarães, S. L., Neves, L. C. R., Bonfim-Silva, E. M., Campos, D. T. S. (2016). Development of pigeon pea inoculated with rhizobium isolated from cowpea trap host plants. Revista Caatinga, 29, 789-795.
- Kakuszi A., Sarvari, E., Solti, A.; Czégény, G., Hideg, E., Hunyadi-Gulyás, E., Bóka, K., Boddi, B. (2016). Light piping driven photosynthesis in the soil: Low-light adapted active photosynthetic apparatus in the under-soil hypocotyl segments of bean (*Phaseolus vulgaris*). Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 161, 422-429.
- Lemaire, G., Oosterom, E. V., Jeuffroy, M. H., Gastal, F., Massignan, A. (2008). Crop species present different qualitative types of response to N deficiency during their vegetative growth. Field Crops Research, 105, 253-265.
- Letty, B. A., Makhubedu, T.; Scogings, P. F.; Mafongoya, P. (2021). Effect of cutting height on non-structural carbohydrates, biomass production and mortality rate of pigeon peas. Agroforestry Systems, 95, 659–667.
- Chun, L., Yuanhang, W., Yunxi, L.; Liyun, Y., Rongshu, D., Lingyan, J., Pandao, L., Guodao, L., Zhiyong, W., Lijuan, L. (2021). Genome-wide analysis of tandem duplicated genes and their contribution to stress resistance in pigeonpea (*Cajanus cajan*). Genomics, 113, 728-735.
- Luo, Z. H., Huang, J. W., Meng, Q. Q., Wu, H, W.; Yang, R. Y., Fu, L. C., Hu, Y. J., Shen, X. L. (2021). Cajanolactone A, a stilbenoid from *Cajanus cajan*, inhibits energy intake and lipid synthesis/storage, and promotes energy expenditure in ovariectomized mice. Biomedicine & Pharmacotherapy, 138, 1-15.
- Mansour, E., Desoky, E. M., Ali, M. M. A., Abdul-Hamid, M. I., Ullah, H., Attia, A., Datta, A. (2021). Identifying drought-tolerant genotypes of faba bean and their agro-physiological responses to different water regimes in an arid Mediterranean environment. Agricultural Water Management, 247, 106754.
- Moreira, F. J. C., Silva, M. C. B., Rodrigues, A. A., Tavares, M. K. N. (2015). Alternative control of root-knot nematodes (*Meloidogyne javanica* and *M. enterolobii*) using antagonists. International Journal of Agronomy and Agricultural Research, v. 7, 121-129.

- Moreira, V. F.; Pereira, A.J.; Guerra, J. G. M.; Guedes, R. E.; Costa, J. R. (2003). Produção de biomassa de guandu em função de diferentes densidades e espaçamentos entre sulcos de plantio. *Seropédica*, Embrapa Agrobiologia, 5p (Comunicado Técnico, 57).
- Moreira, F. M. S. & Siqueira, J. O. *Microbiologia e Bioquímica do Solo*. Editora UFLA, p729, 2006.
- NITRO1000. Inoculantes biológicos. (2020). <<http://www.nitro1000.com.br/feijao>>.
- ONU - FAO. (2021). Programa Desafio do CGIAR: Culturas Biofortificadas para Melhor Nutrição. <<https://sustainabledevelopment.un.org/partnership/?p=1490>>.
- R Core Team. (2021). R Foundation for Statistical Computing. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria. < <https://www.r-project.org/>>.
- Raven, P. H., Evert, R. F., Eichhorn, S. E. (2014). *Biologia Vegetal*. (Guanabara Koogan), Rio de Janeiro. 1-876.
- Saxena, K. B., Bohra, A.; Choudhary, A. K., Sultana, R.; Sharma, M., Pazhamala, L. T., Saxena, R. K. (2021). The alternative breeding approaches for improving yield gains and stress response in pigeonpea (*Cajanus cajan*). *Plant Breed*, 140, 74-86.
- Sharma, R., Paliwala, J. S., Choprab, P., Dograa, D., Pooniyac, V., Bisariaa, V. S.; Swarnalakshmi, K.; Sharma, S. (2017). Survival, efficacy and rhizospheric effects of bacterial inoculants on *Cajanus cajan*. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 240, 244–252.
- Sinan, K. I., Mahomoodally, M. F., Eyupoglu, O. E., Etienne, O. K., Sadeer, N. B., AK, G., Behl, T., Zengin, G. (2021). HPLC-FRAP methodology and biological activities of different stem bark extracts of *Cajanus cajan* (L.) Millsp. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 192, 113678.
- Sinha, P., Singh, V. K.; Saxena, R. K., Khan, A. W., Abbai, R., Chitikineni, A., Desai, A., Molla, J., Upadhyaya, H. D., Kumar, A. E., Varshney, R. K. (2020). Superior haplotypes for haplotype-based breeding for drought tolerance in pigeonpea (*Cajanus cajan* L.). *Plant Biotechnology Journal*, 18, 2482-2490.
- Soureshjani, H. K., Nezami, A., Kafi, M., Tadayon, M. (2019). Responses of two common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes to deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 213, 270-279.
- Souza, G. C., Frazão, L. A., Dias, R. D., Gonçalves Lucas, C. S., Rodrigues, C. H. O., Camargo, P. B. (2018). Respostas fisiológicas e produtividade de feijoeiro cultivado em sistema silviagrícola com diferentes manejos de adubação. *Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas*, 10, 1-17.
- Sreeharsha, R. V., Sekhar, K. M., Reddy, A. R. (2015). Delayed flowering is associated with lack of photosynthetic acclimation in Pigeon pea (*Cajanus cajan* L.) grown under elevated CO₂. *Plant Science*, 231, 82-93.
- Taíz L., Zieger E., Moller I. M., Murphy A. (2017). *Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal*. (Artemed 1-888).
- Wang, H., Zhang, M., Song, Y., Li, H., Huang, H., Shao, M., Liu, Y., Kang, Z. (2018). Carbon dots promote the growth and photosynthesis of mung bean sprouts. *Carbon*, 136, 94-102.
- WRB/FAO. (2015). World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports N°. 106. FAO, Rome. <http://www.fao.org/3/i3794en/i3794en.pdf>
- Yuan, M., Ruark, M. D., Bland, W. L. (2017). A simple model for snap bean (*Phaseolus vulgaris* L.) development, growth and yield in response to nitrogen. *Field Crops Research*, 211, 125-136.

4.2 Artigo 2 - Atividade biológica do solo cultivado com feijão-guandu sob diferentes manejos de adubação nitrogenada

Este artigo foi elaborado conforme normas da Revista Ciência Rural

Atividade biológica do solo cultivado com feijão-guandu sob diferentes manejos de adubação

RESUMO

O manejo do feijão-guandu, por meio da aplicação de fertilizantes e inoculantes, pode aumentar a qualidade biológica do solo e o aproveitamento do N pelas plantas. Assim, objetivou-se analisar o carbono e nitrogênio totais e microbianos, a respiração basal do solo e atividade enzimática do solo cultivado com feijão-guandu (*Cajanus cajan* (L) Mill sp.) com diferentes manejos de adubação nitrogenada e inoculação com *Rhizobium tropici*. O estudo foi realizado na casa de vegetação, em delineamento experimental de blocos casualizados, com três repetições, esquema fatorial 3x5 (genótipos x manejos de adubação e inoculação). No florescimento pleno, após o cultivo com feijão-guandu, procedeu-se a coleta de solo em 0-20 cm, para avaliações do carbono orgânico total; nitrogênio total; carbono e nitrogênio da biomassa microbiana; respiração basal do solo; atividade das enzimas β -glicosidase e urease. Os dados foram submetidos à análise de variância e ao teste Tukey, a 5% de probabilidade. Foi construída uma matriz de correlações de Pearson, a similaridade entre os tratamentos foi dada pela distância de Mahalanobis e o agrupamento pelo *Unweighted Pair-Group Method using Arithmetic Averages*. Os genótipos experimentais BRS03 e BRS04 obtiveram elevação nos teores de Cmic e qMic do solo, indicando a potencialidade desses materiais em relação a melhoria da qualidade biológica do solo. A combinação de adubação base e inoculação com *Rhizobium tropici* aumentou a atividade das enzimas β -glicosidase e urease no solo.

Palavras-chave: *Cajanus cajan* (L) Mill sp., carbono total e microbiano, nitrogênio total e microbiano, quociente microbiano e metabólico, β -glicosidase e urease.

INTRODUÇÃO

O feijão-guandu (*Cajanus cajan* (L) Mill sp.) se destaca no cenário agrícola mundial devido a adaptabilidade e estabilidade produtiva frente as condições edafoclimáticas. Além disso, apresenta interessante potencial nutricional para alimentação humana (BENÍTEZ et al., 2021; ROVALINO-CÓRDOVA et al., 2018) e animal (BUTHELEZI et al., 2019), uso medicinal (WU et al., 2019), capacidade de conservação do solo (SINGH et al., 2020) e da água, sendo esse decorrente do processo de fixação biológica de nitrogênio (FABINO NETO et al., 2021), que reduz a demanda de adubos nitrogenados.

O manejo dessa leguminosa, por meio da aplicação de fertilizantes e inoculantes, pode aumentar a qualidade biológica do solo e o aproveitamento do N pelas plantas. A qualidade biológica do solo está intimamente associada a alguns atributos como: carbono e nitrogênio da biomassa microbiana; atividade enzimática; respiração basal microbiana no solo; quocientes metabólico e microbiano e; carbono orgânico. Já a biomassa microbiana é responsável pela decomposição e transformação da matéria orgânica, além de influenciar no fluxo de C e N, ciclagem de nutrientes e estruturação/formação do solo (COSTA et al., 2013).

Estudos indicam a ocorrência de 10 a 50 mil espécies de microrganismos em um grama de solo. No entanto, apenas 1% dessa diversidade microbiológica são passíveis de serem isolados e cultivados em condições laboratoriais (AMARANTE et al., 2018). Isso demonstra a necessidade de estudos para uma melhor compreensão da atividade biológica no solo. A avaliação e entendimento de como esses microrganismos interagem entre si no solo é crucial para criar um ambiente saudável e equilibrado, e assim obter sucesso nas atividades agrícolas.

A quantificação do carbono orgânico e da atividade da biomassa microbiana do solo têm sido ferramentas utilizadas como indicadores da qualidade do solo em ambientes de produção agrícola, uma vez que estão associados às funções ecológicas do ambiente e são capazes de refletir as alterações causadas pelos diferentes sistemas de manejo do solo (ARAGÃO et al., 2012). Estudos recentes demonstram a importância dos indicadores biológicos na detecção das alterações ambientais (GONÇALVES et al., 2020; PIZZANI et al., 2018; STIEVEN et al., 2020).

A atividade biológica do solo pode ser representada em quase toda sua totalidade pela biomassa microbiana, uma vez que esta é a principal fonte de enzimas, que catalisam diversas reações que representam a relação fonte e dreno de carbono e troca de nutrientes entre a atmosfera e o sistema solo-planta (MOREIRA & SIQUEIRA, 2006). Qualquer estresse nesse sistema afeta a população, a diversidade e a atividade microbiológica do solo (MATOSO et al., 2012).

Pesquisas que envolvem análises biológicas do solo tornam-se importantes aliadas para avaliações mais detalhadas sobre o ambiente de produção, pois permitem verificar de forma rápida as respostas e adequações necessárias no manejo. A hipótese deste estudo é que o N associado a inoculação potencializa a fixação biológica de nitrogênio e promove melhoria na qualidade biológica do solo. Diante disso, o objetivo foi analisar o carbono e nitrogênio totais e microbianos, a respiração basal do solo e a atividade enzimática do solo cultivado com feijão-guandu (*Cajanus cajan* (L) Mill sp.) com diferentes manejos de adubação nitrogenada.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em uma casa de vegetação, localizada no município de Montes Claros-MG (16°40'58,5" S, 43°50'25,6" W e 626 m de altitude), em delineamento experimental de blocos completos casualizados, com três repetições, em esquema fatorial 3x5, sendo o primeiro fator representado pelos genótipos BRS03, BRS04 (experimentais) e IAPAR 43 (cultivar comercial). O segundo fator correspondeu a cinco manejos de adubação e inoculação: apenas adubação base (AB), adubação de base com nitrogênio e inoculante (AB+N+I), adubação de base e nitrogênio (AB+N), adubação de base e inoculante (AB+I), sem a aplicação de fertilizante ou inoculante (SEM). As parcelas experimentais foram constituídas por uma planta por vaso de 10 kg de solo.

O solo utilizado para condução do experimento foi coletado na área experimental da UFMG, em Montes Claros-MG, e foi identificado como Nitossolo (WRB/FAO, 2015), com a seguinte caracterização química antes da implantação do experimento: pH (água) = 4,5; P = 1,51 mg dm⁻³; K = 20,69 mg dm⁻³; Ca⁺² = 2,50 cmol_c dm⁻³; Mg⁺² = 1,00 cmol_c dm⁻³; Al⁺³ = 1,34 cmol_c dm⁻³; H+Al = 9,62 cmol_c dm⁻³; CTC efetiva = 5,13 cmol_c dm⁻³; saturação por base = 28%, matéria orgânica = 4,41 dag kg⁻¹ e textura argilosa.

A correção do solo foi realizada utilizando-se corretivo que contém 60% de CaO₂, 30% de MgO₂ e PRNT de 180% (GEOX), com o intuito de aumentar a saturação por bases para 60%, seguindo a recomendação proposta por FARIAS et al. (2013). O solo permaneceu incubado por 30 dias, mantendo-se a umidade em 60% de sua capacidade de campo. Após o tempo de incubação, foi realizada a adubação básica com reagentes P.A., de acordo com CANTARUTTI et al. (2007), para plantas cultivadas em vasos, em ambientes controlados, com exceção do nitrogênio.

Nos tratamentos que receberam adubação nitrogenada, utilizou-se a fonte Ureia P.A., vinte dias após a emergência das plântulas. As sementes foram inoculadas na pré-semeadura com inoculante comercial composto por *Rhizobium tropici* Semia 4077, Semia 4080, Semia 4088, vitaminas, sais minerais, fonte de carbono, turfa (pó)/água, espessante, conservante e estabilizante PVP (aquoso), na dosagem 100 mL g⁻¹ para 25 kg de sementes (NITRO1000, 2019).

A semeadura do feijão-guandu foi realizada com três sementes por vaso. Após a germinação, manteve-se somente uma planta por vaso, com umidade próxima a capacidade de campo. No florescimento pleno (BRS03: 169 dias; BRS 04: 170 dias e IAPAR 43: 73 dias) procedeu-se a coleta de solo numa profundidade de 0-20 cm, próximo ao sistema radicular para avaliações experimentais. Posteriormente, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos com uso de respiro, identificados e armazenados em geladeira (4 °C) até a realização das análises. No laboratório foi realizado o peneiramento das amostras em peneira de malha de 2 mm e retirou-se todos os fragmentos vegetais e animais por meio de catação manual.

O carbono orgânico total (COT) foi determinado pela metodologia de Mendonça e Silva (2017), adaptado de YEOMANS & BREMNER (1988). Para a determinação do nitrogênio (N) total utilizou-se método empregado por MENDONÇA & SILVA (2017), adaptado de BREMNER & MULVANEY (1982) e TEDESCO et al. (1995). Para a determinação do carbono e nitrogênio da biomassa microbiana (Cmic e Nmic) foi utilizado o método da fumigação-extração descrito por BROOKES et al. (1985) e TEDESCO et al. (1985), modificado por SILVA et al. (2007), em que as amostras foram fumigadas em dessecador com uso de clorofórmio, mantidas por um período de 48 horas. Posteriormente foi realizada a extração das amostras com solução de 0,5M de sulfato de potássio (K₂SO₄). O Nmic foi quantificado por destilação de

arraste de vapor (Kjeldalh). O quociente microbiano foi obtido pela relação entre o Cmic e o COT (SILVA et al., 2007).

A respiração basal do solo (RBS) foi determinada de acordo com a metodologia proposta por MENDONÇA & SILVA (2017), adaptado de CURL & RODRIGUES-KABANA (1972) e STOTZKY (1965). As amostras foram incubadas por um período de sete dias em frascos sem a presença de luz, com umidade do solo ajustada para 60% da capacidade de campo, para a estabilização dos microrganismos. Posteriormente foram montados potes herméticos com um frasco contendo NaOH 0,5 mol L⁻¹, as avaliações seguiram nos seguintes intervalos de tempo: 24, 48, 72, 96 e 120 horas. Para o cálculo da RBS foram considerados os três últimos valores após a estabilização, nos intervalos de 72 e 96 horas. O quociente metabólico (qCO₂) foi calculado através da razão entre RBS e Cmic (SILVA et al., 2007).

A avaliação da atividade da enzima beta-glucosidase foi baseada na determinação colorimétrica do p-nitrofenol liberado pelas enzimas β-glucosidases do solo após incubação com uma solução tamponada de p-nitrofenil-β-D-glucopiranosídeo. As leituras foram realizadas em um espectrofotômetro a 420 nm (EIVAZI & TABATABAI, 1988). Para avaliação da atividade da enzima urease (AU), incubou-se a amostra de solo com solução de ureia por 2 horas a 37 °C, e posteriormente foi determinado o amônio (NH₄⁺) liberado (TABATABAI, 1994).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade, com auxílio do Software R (R CORE TEAM, 2021), e posteriormente a análise de variância multivariada. A partir das médias dos tratamentos foi construída uma matriz de correlações de Pearson a fim de estabelecer relações entre as variáveis estudadas e compreender melhor a atividade biológica juntamente com os resultados do ponto de vista univariado. Foi calculado também a matriz de distância entre os tratamentos pela distância de Mahalanobis. A partir da matriz de distância foi realizado um agrupamento pelo método UPGMA “Unweighted Pair Group Method with Arithmetic Average” (SOKAL & MICHENER, 1958) para conhecer o padrão de similaridade dos tratamentos e quais fatores influenciaram, considerando as variáveis conjuntamente, permitindo agrupar sistemas de manejo com base nas características similares que essas possuem (GUIMARÃES et al., 2017). As análises foram realizadas com o software RBio (BHERING, 2017).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O solo cultivado com o genótipo BRS03 na presença da adubação base, nitrogênio e inoculante (AB+N+I) apresentou menor teor de carbono orgânico total (COT), quando comparado aos manejos que receberam somente nitrogênio ou inoculante, ou ausência de ambos (Tabela 1). Para essa mesma característica, o solo cultivado com a cultivar IAPAR 43, no manejo de ausência de adubação base, inoculante e nitrogênio (SEM), apresentou menores valores de COT tanto em relação aos outros genótipos, como também aos manejos que receberam apenas uma fonte de variação (AB+N e AB+I). Já o solo cultivado com o genótipo BRS04 não apresentou diferença estatística entre os manejos de adubação para esta variável.

Tabela 1 - Carbono orgânico total (COT, g kg⁻¹) de solo cultivado com feijão-guandu, submetido a cinco manejos de adubação e inoculação com *Rhizobium tropici*, em Nitossolo.

Genótipos	Manejos de adubação e inoculação				
	AB	AB+N+I	AB+N	AB+I	SEM
BRS03	10,1 Aba	9,8 Bb	10,5 Aa	10,6 Aa	10,5 Aa
BRS04	10,6 Aa	10,6 Aa	10,6 Aa	10,4 Aa	10,5 Aab
IAPAR43	10,5 Aba	10,2 ABab	10,7 Aa	10,8 Aa	10,0 Bb
CV (%)	2,71				

*Médias com letras iguais, maiúsculas na linha e minúsculas nas colunas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. CV: coeficiente de variação. AB: adubação base; AB+N+I: adubação base com nitrogênio e inoculante; AB+N: adubação de base e nitrogênio; AB+I: adubação base e inoculante; SEM: apenas o solo corrigido, sem aplicação de fertilizante ou inoculante.

Sabe-se que as respostas sobre a inoculação de bactérias fixadoras em leguminosas podem ser distintas em função dos cultivares (BÁRBARO et al., 2009). O solo cultivado com a BRS03 (tratamento AB+N+I) obteve menor teor de COT, isso, possivelmente, está associado ao efeito da adubação nitrogenada (maior disponibilidade de nitrogênio). De acordo com Oliveira et al. (2003), a resposta microbiana é maior ao realizar uma adubação nitrogenada inicialmente, estando esse fator relacionado ao maior vigor da planta antes de iniciar a nodulação, melhorando esse processo, e assim apresentando maiores populações microbianas ou estando relacionado a maior mineralização, o que indica maior atividade biológica. Além disso, os resultados demonstraram, para essa característica, que os solos cultivados com os genótipos BRS03 e IAPAR 43 apresentam maior sensibilidade às condições contrastantes, seja com excesso ou ausência de fontes nitrogenadas.

Os resultados de COT para os solos cultivados com os genótipos BRS03 e BRS04 sinalizam potencial igual ou superior àquele cultivado com a cultivar comercial IAPAR 43, além de apresentar menor susceptibilidade de oscilação em relação ao manejo, com exceção do tratamento AB+N+I para o solo com a BRS03. De acordo com MENDONÇA & MATOS (2017), a seleção de materiais que incrementem o teor de matéria orgânica do solo contribui para melhoria das qualidades físicas, químicas e biológicas do solo.

Para o N total houve apenas o efeito principal dos manejos, e os valores variaram de 1,09 a 1,23 g kg⁻¹, sendo o menor valor referente ao AB e o maior ao AB+I (Tabela 2). Os solos manejados com AB+N (1,23 g kg⁻¹), AB+N+I (1,21 g kg⁻¹) e AB+I (1,21 g kg⁻¹) obtiveram os maiores teores de N total, possivelmente devido a aplicação de fertilizante nitrogenado e, decorrente da atividade biológica fixadora de N nos tratamentos com inoculação.

Tabela 2 - Nitrogênio total (N total, g kg⁻¹) e relação C/N do solo cultivado com feijão-guandu, submetido a cinco manejos de adubação e inoculação com *Rhizobium tropici*, em Nitossolo.

Manejos de adubação	N total	Relação C/N
AB	1,09 b	9,63 a
AB+N+I	1,21 a	8,46 b
AB+N	1,23 a	8,67 ab
AB+I	1,21 a	9,03 ab
SEM	1,16 ab	8,95 ab
CV (%)	4,99	7,86

*Médias com letras iguais, maiúsculas na linha e minúsculas nas colunas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. CV: coeficiente de variação. AB: adubação base; AB+N+I: adubação base com nitrogênio e inoculante; AB+N: adubação de base e nitrogênio; AB+I: adubação base e inoculante; SEM: apenas o solo corrigido, sem aplicação de fertilizante ou inoculante.

O teor de N total encontrado no solo pode explicar a maior relação C/N observada no tratamento AB em comparação ao AB+N+I, correspondendo a 9,63 e 8,46, respectivamente (Tabela 2). O maior teor de nitrogênio no solo de AB+N+I contribuiu para redução da relação C/N, demonstrando que pode ter ocorrido maior mineralização e disponibilização deste nutriente para as plantas. SELLE (2007), em estudo de ciclagem de nutrientes em ecossistemas florestais, verificou também a influência do N da serapilheira nesse processo.

O teor de carbono da biomassa microbiana (Cmic) não foi influenciado pelos manejos de adubação e inoculação com *Rhizobium* ($p > 0,05$). Entretanto, o cultivo com os genótipos BRS03 e BRS04 propiciaram maiores teores Cmic no solo (114,0 e 120,1 mg C kg solo⁻¹, respectivamente), em comparação ao IAPAR 43 (59,80 mg C kg solo⁻¹), reafirmando o potencial de incremento da atividade biológica do solo com uso desses genótipos experimentais. De acordo com SOUZA (2015) e INÁCIO et al. (2020), esses resultados podem ser associados aos maiores volumes de raízes e exsudados radiculares, aumentando o aporte de carbono, fornecendo assim, mais energia para a comunidade microbiana, estimulando a proliferação da biomassa microbiana do solo.

Os maiores valores de Cmic resultam em menores perdas de nutrientes no sistema solo-planta via imobilização temporária, daí a importância da implementação de manejos e genótipos que favorecem o desenvolvimento da biomassa microbiana (ROSCOE et al., 2006). O valor de Cmic na IAPAR 43 representou menos de 1% do valor do COT, sendo que o intervalo aceitável é 1% a 5% do COT (JENKINSON e LADD, 1981), indicando que a adoção dessa cultivar pode ter proporcionado condição desfavorável ao desenvolvimento dos microrganismos do solo para as condições avaliadas, considerando que houve revolvimento do solo e não houve tempo suficiente para recuperação/adaptação da comunidade microbiana.

A aplicação de fertilizantes, nitrogênio e *Rhizobium* (AB+N+I), propiciou respostas distintas entre cultivares para o teor de nitrogênio da biomassa microbiana (Nmic) do solo, sendo que na cultivar BRS03

obteve-se a média de 38,89 mg kg solo⁻¹ de N, ao passo que na BRS04 o teor de Nmic correspondeu a 10,98 mg N kg solo⁻¹. Esse resultado demonstrou que o cultivo da BRS03 pode ter proporcionado ambiente mais favorável ao desenvolvimento de microrganismos responsáveis pela imobilização de N.

Quanto ao quociente microbiano, foi detectada apenas variação decorrente dos genótipos, sendo que BRS03 e BRS04 apresentaram maiores valores, sendo de 1,10 e 1,13%, respectivamente, em relação a IAPAR 43 (0,57%). De acordo com JAKELAITIS et al. (2008), o qMic varia de 1 a 4% em condições normais. Diante dos índices apresentados neste estudo, os solos cultivados com os genótipos da Embrapa apresentaram maior adaptação as condições de cultivo (Cmic, Qmic) e, conseqüentemente, melhor eficiência no uso dos compostos orgânicos (GONÇALVES et al., 2020).

Como não houve diferença no teor de N total entre as cultivares, observou-se que no AB+N+I a maior participação de Nmic em BRS03 foi responsável pela maior relação Nmic/N total (%) em relação a BRS04 (3,17 e 0,90%, respectivamente) (Tabela 3).

Tabela 3 - Relação Nmic/Ntotal (%) de solo cultivado com feijão-guandu, submetidos a cinco manejos de adubação e inoculação com *Rhizobium tropici*.

Genótipos	Manejos de adubação e inoculação				
	AB	AB+N+I	AB+N	AB+I	SEM
BRS03	2,78 Aa	3,17 Aa	1,88 Aa	1,55 Aa	1,18 Aa
BRS04	1,86 Aa	0,90 Ab	1,87 Aa	1,37 Aa	2,31 Aa
IAPAR 43	1,69 Aa	1,32 Aab	2,46 Aa	3,03 Aa	3,05 Aa
CV(%)	48,04				

*Médias com letras iguais, maiúsculas na linha e minúsculas nas colunas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. CV: coeficiente de variação. AB: adubação base; AB+N+I: adubação base com nitrogênio e inoculante; AB+N: adubação de base e nitrogênio; AB+I: adubação base e inoculante; SEM: apenas o solo corrigido, sem aplicação de fertilizante ou inoculante.

De maneira geral, a imobilização do nitrogênio na biomassa microbiana foi pouco eficiente, independentemente do genótipo ou manejo adotado, ficando abaixo dos 4%, como mencionado por GONÇALVES et al. (2020). Um dos fatores que pode ter contribuído para essa baixa eficiência foi o revolvimento do solo para correção e implantação do experimento. Segundo Assis et al. (2019), valores reduzidos de Cmic e Nmic podem estar associados a sensibilidade desses atributos microbiológicos ao manejo do solo.

Quanto à respiração basal, o solo cultivado com a IAPAR 43 (0,194 mg C-CO₂ kg⁻¹ solo h⁻¹), mesmo com menor teor de Cmic, obteve resultados semelhantes à BRS03 e BRS04 (0,196 e 0,197 mg C-CO₂ kg⁻¹ solo h⁻¹, respectivamente).

O qCO₂ diferiu em função da interação genótipos por manejo da adubação e inoculação (Tabela 4). No solo da cultivar BRS03, o quociente metabólico foi menor no manejo AB+I (1,19 mg C-CO₂ g⁻¹ Cmic-C h⁻¹) em comparação ao AB (5,90 mg C-CO₂ g⁻¹ Cmic-C h⁻¹). A inoculação ocorrida em AB+I, nesse genótipo, favoreceu o desenvolvimento de microrganismos mais eficientes no aproveitamento e

armazenamento de compostos orgânicos, considerando que não houve diferença significativa no teor de COT entre os manejos. Assim, verificou-se que houve maior incorporação de Cmic e menos perda de C via CO₂ com a respiração. Existem autores (REIS JUNIOR & MENDES 2007; ASSIS et al., 2019) que afirmam que resultados dessa natureza caracterizam uma biomassa mais eficiente na utilização desses compostos.

No solo que recebeu apenas a adubação base, o cultivo de BRS03 propiciou maior valor de qCO₂ em comparação à BRS04 e IAPAR 43. Já no manejo AB+I esse comportamento foi modificado, sendo que IAPAR 43 obteve valor superior aos materiais BRS03 e BRS04 (Tabela 4). DELBEM et al. (2011) apontam que há o aumento do qCO₂ diante de perturbações ao agroecossistema, e que esse comportamento caracteriza como uma reação da comunidade microbiana. Esse resultado também pode ser explicado pelo fato de que qCO₂ elevados indicam comunidades microbianas em estágios iniciais de desenvolvimento, ou seja, com maior proporção de microrganismos ativos (ROSCOE et al., 2006).

Tabela 4 - Valores do quociente metabólico (qCO₂, mg C-CO₂ g⁻¹ Cmic-C h⁻¹) de solo cultivado com feijão-guandu, submetido a cinco manejos de adubação e inoculação com *Rhizobium tropici*.

Genótipos	Manejos de adubação e inoculação				SEM
	AB	AB+N+I	AB+N	AB+I	
BRS03	5,90 Aa	1,52 ABa	1,62 ABa	1,19 Bb	2,55 Aba
BRS04	1,48 Ab	1,70 Aa	2,15 Aa	1,61 Ab	2,65 Aa
IAPAR 43	2,54 Aab	3,97 Aa	3,69 Aa	6,81 Aa	5,72 Aa
CV (%)	29,63				

*Médias com letras iguais, maiúsculas na linha e minúsculas nas colunas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. CV: coeficiente de variação. AB: adubação base; AB+N+I: adubação base com nitrogênio e inoculante; AB+N: adubação de base e nitrogênio; AB+I: adubação base e inoculante; SEM: apenas o solo corrigido, sem aplicação de fertilizante ou inoculante.

A atividade biológica do solo também foi avaliada pela presença da β-glicosidase - e urease (Tabela 5). Verificou-se que a atividade da enzima β-glicosidase no tratamento SEM foi inferior aos demais manejos de adubação nos três genótipos avaliados, indicando, assim, que a falta de adubação e inoculação afeta negativamente na atividade desta enzima no solo. Como a β-glicosidase está associada ao ciclo do carbono, a ausência de adubação mineral e inoculação no SEM pode ter contribuído para o menor crescimento biológico vegetal e microbiano (MATSUOKA et al., 2003). Apesar de não diferir estatisticamente dos demais manejos, também se observou redução do Cmic no SEM, o que pode estar relacionado com o resultado apresentado pela β-glicosidase. Esses resultados corroboram resultados obtidos por VIEIRA & RAMOS (2019) ao descreverem que as enzimas do solo expressam alterações na microbiota devido a sua alta sensibilidade ao manejo implementado.

Tabela 5 - Valores de β -glicosidase ($\mu\text{g p-nitrofenol h}^{-1} \text{g}^{-1}$ solo) e urease ($\mu\text{g NH}_4^+ - \text{N g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$) de solo cultivado com feijão-guandu, submetido a cinco manejos de adubação e inoculação com *Rhizobium tropici*.

Enzima	Cultivar	Manejos de adubação e inoculação				
		AB	AB+N+I	AB+N	AB+I	SEM
β -glicosidase	BRS03	34,2 Ba	38,4 ABab	39,5 Aa	35,5 ABb	25,3 Cb
	BRS04	37,9 BCa	34,4 CDb	41,5 ABa	42,9 Aa	31,2 Da
	IAPAR43	36,1 ABa	39,2 Aa	33,2 Bb	37,7 ABb	23,0 Cb
CV						
Urease	BRS03	166,3 Aa	138,6 Ba	143,6 ABa	148,7 ABa	148,4 ABa
	BRS04	142,6 Ab	147,0 Aa	114,0 Bb	150,8 Aa	114,8 Bb
	IAPAR43	117,1 Bc	134,5 ABa	131,2 ABb	143,4 Aa	92,6 Cc
CV						

*Médias com letras iguais na mesma sessão, maiúsculas na mesma linha e minúsculas nas colunas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. CV: coeficiente de variação. AB: adubação base; AB+N+I: adubação base com nitrogênio e inoculante; AB+N: adubação de base e nitrogênio; AB+I: adubação base e inoculante; SEM: apenas o solo corrigido, sem aplicação de fertilizante ou inoculante.

Os manejos de adubação AB, AB+N, AB+I e SEM em BRS03 contribuíram com maior atividade enzimática da urease em relação aos genótipos BRS04 e IAPAR 43 (Tabela 5). No manejo SEM, a atividade dessa enzima na IAPAR 43 foi menor em relação aos demais manejos de adubação. O solo cultivado com essa cultivar e submetido a determinado manejo pode ter menor potencial de converter o N orgânico em mineral, prejudicando o processo de mineralização do N (LANNA et al., 2010). Há fatores que influenciam a produção de enzimas pelos microrganismos, principalmente aqueles que interferem no desenvolvimento dos mesmos, como disponibilidade de água e temperatura em faixa adequada e presença de outros nutrientes que favoreceram os processos metabólicos dos microrganismos (STIEVEN et al., 2020). Em condição de solo natural (SEM), observou-se que, de maneira geral, houve redução da atividade enzimática.

A matriz de correlação de Pearson obtida pelas variáveis biológicas do solo demonstra poucas associações entre as variáveis estudadas (Figura 1). Correlações altas entre essas variáveis podem explicar relações fundamentais para a manutenção do equilíbrio da microbiota do solo (SANTOS et al., 2011). É possível verificar que as variáveis N total e C/N obtiveram magnitudes mais elevadas de correlação (-0,89), e relações medianas entre qCO_2 com Nmic/Ntotal .

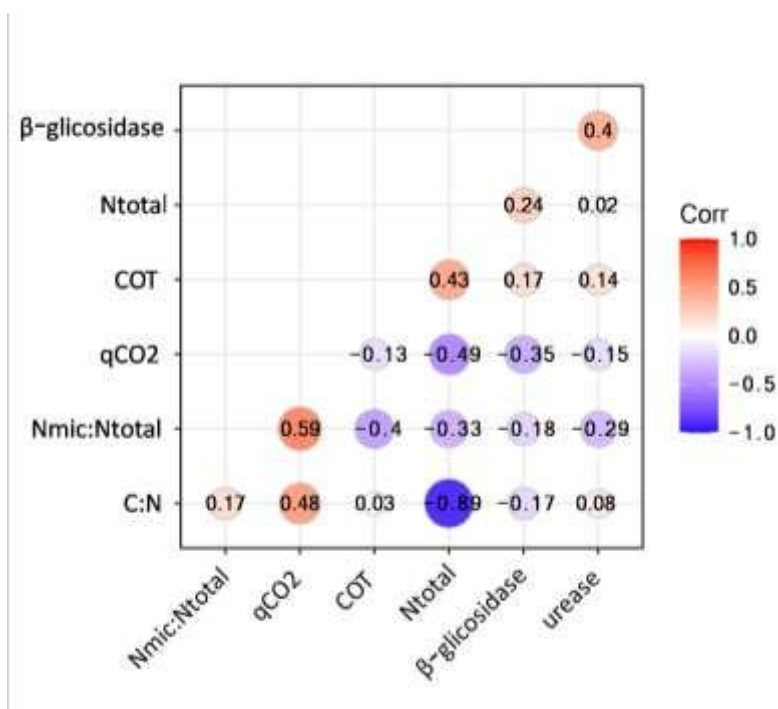


Figura 1 - Matriz de correlação de Pearson das médias das variáveis avaliadas. Círculos maiores e mais escuros indicam maiores magnitudes de correlação e círculos menores e mais claros indicam menores magnitudes de correlação. Correlações positivas são vermelhas e negativas em azul. β-glicosidase (μg p-nitrofenol $\text{h}^{-1} \text{g}^{-1}$ solo); Ntotal (nitrogênio total, g kg^{-1}); COT: carbono orgânico total (g kg^{-1}); urease ($\mu\text{g NH}_4^+ - \text{N g}^{-1}$ solo h^{-1}); qCO_2 : quociente metabólico ($\text{mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ Cmic-C h}^{-1}$); Nmic.Ntotal: Nmicrobiano/Ntotal (%); C:N relação C/N.

As baixas relações C/N indicam maior taxa de decomposição da matéria orgânica. Como foi apresentado na Tabela 2, o maior teor de nitrogênio no solo de AB+N+I contribuiu para redução da relação C/N, o que foi comprovado pela elevada magnitude e correlação negativa entre N total e C/N, ou seja, o aumento do N total contribuiu para reduzir a C/N, sendo um fator de extrema importância para indicar maior disponibilidade de nutrientes para as plantas.

Pode-se observar também que a correlação COT e N total foi de apenas 0,43. SANTOS et al. (2011) observaram para as mesmas variáveis uma correlação de 0,98. As correlações positivas entre COT e N total e qCO_2 , indicam maiores concentrações desses elementos no solo, dando suporte a uma população maior de microrganismos e, conseqüentemente, maior taxa de respiração no solo. Assim, proporcionaria melhores condições para o estabelecimento de plantas (TU et al., 2006).

A análise de variância multivariada apresentou-se significativa pelo teste de Wilks, a 5% de probabilidade para a interação genótipos x manejos. O dendrograma obtido pelo método UPGMA (ligação média entre os grupos) e baseado na distância de Mahalanobis obteve uma correlação cofenética de 0,77 (Figura 2), isso indica que houve uma boa representação da matriz da distância entre os tratamentos na dispersão gráfica. Houve formação de três grupos a partir das variáveis analisadas e considerando o Método de MOJENA (1977) para o estabelecimento dos grupos, com valor 26,19 para k igual a 1,25. De acordo com a análise, os tratamentos mais próximos foram BRS03:AB+I e BRS04:AB+I e os mais distantes foram BRS03:AB e IAPAR 43:SEM.

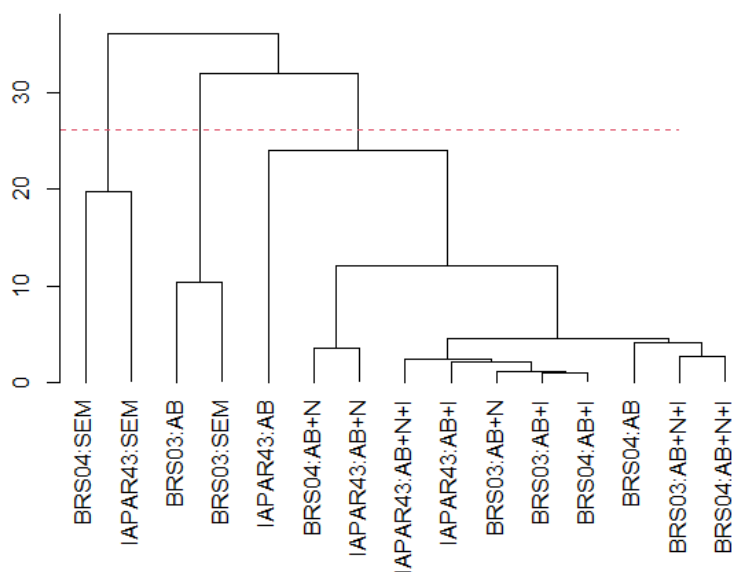


Figura 2 - Dendrograma obtido pelo método UPGMA a partir das distâncias de Mahalanobis das variáveis estudadas. Genótipos: BRS03, BRS04 e IAPAR 43. AB: apenas adubação base, AB+N+I: adubação de base com nitrogênio e inoculante, AB+N: adubação de base e nitrogênio, AB+I: adubação de base e inoculante, SEM: sem a aplicação de fertilizante ou inoculante.

Os agrupamentos G1 e G2 chamam atenção por agruparem os manejos nos quais não há aplicação de fertilizante ou inoculante (SEM) ou apenas adubação base (AB), ou seja, a ausência do inoculante evidencia efeito sobre as respostas biológicas do solo. Os resultados complementam a menor taxa enzimática observada para as duas enzimas avaliadas com o SEM (Tabela 5), logo, indicativo de menor atividade microbiana. Vale ressaltar que o dendrograma diz respeito a todas as variáveis biológicas avaliadas conjuntamente, podendo-se inferir que a atividade biológica de modo geral foi afetada pela ausência de inoculante.

O agrupamento G3 é formado pela maioria dos tratamentos que receberam adubação nitrogenada ou inoculante. De fato, autores evidenciam que a inoculação pode ter efeito semelhante a adubação nitrogenada (BÁRBARO, 2009; SILVA *et al.*, 2018). Como o resultado da análise multivariada foi significativo para a interação entre as cultivares, os resultados também foram influenciados por elas. No entanto, fortalece a importância do nitrogênio de modo geral para a atividade microbiana no solo.

CONCLUSÕES

Os solos cultivados com os genótipos experimentais BRS03 e BRS04 do feijão-guandu obtiveram elevação nos teores de Cmic e qMic, indicando a potencialidade desses genótipos em relação melhoria da qualidade biológica do solo.

A combinação de adubação base e inoculação com *Rhizobium tropici* aumentou a atividade das enzimas β -glicosidase e urease no solo.

REFERÊNCIAS

AMARANTE, E. A. L. et al. Agricultura familiar e a sustentabilidade: novos arranjos e processos. **Brazilian Journal of Development**, v. 4, n.7, p. 4419-4432, 2018. Available from: <<https://brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/626/527>>. Accessed: Oct. 22, 2020.

ARAGÃO, D. V. et al. Avaliação de indicadores de qualidade do solo sob alternativas de recuperação do solo no Nordeste Paraense. **Acta Amazônica**, v. 42, n. 1, p. 11-18, 2012. Available from: <<https://www.scielo.br/j/aa/a/XVRg9YtCBCnZSDp3Bc5Fqxs/>>. Accessed: Mar. 22, 2021.

BÁRBARO, I. M.; et al. Análise de cultivares de soja em resposta à inoculação e aplicação de cobalto e molibdênio. **Revista Ceres**, v. 56, n. 3, 2009. Available from: <<https://www.redalyc.org/pdf/3052/305226745017>>. Accessed: Mar. 22, 2021.

BHERING, L. L. Rbio: A Tool For Biometric And Statistical Analysis Using The R Platform. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v.17, p. 187-190, 2017. Available from: <<https://doi.org/10.1590/1984-70332017v17n2s29>>. Accessed: Mar. 22, 2021.

ASSIS, P. C. R. et al. Atributos físicos, químicos e biológicos do solo em Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. **Revista Agrarian**. v. 12, n. 43, p. 57-70, 2019. Available from: <<https://doi.org/10.30612/agrarian.v12i43.8520>>. Accessed: Dez. 21, 2021.

BUTHELEZI, L. S. et al. Influence of drying technique on chemical composition and ruminal degradability of subtropical *Cajanus cajan* L. **Animal Nutrition**, v. 5, n. 1, p. 95-100, 2019. Available from: 10.1016/j.aninu.2018.03.001. Accessed: Dez. 17, 2021.

BENÍTEZ, R. B. et al. Enzymatic hydrolysis as a tool to improve total digestibility and techno-functional properties of pigeon pea (*Cajanus cajan*) starch. **Heliyon**, v. 7, n. 8, 2021. Available from: <10.1016/j.heliyon.2021.e07817>. Accessed: Oct. 15, 2021.

BREMNER, J. M.; MULVANEY, C. S. Total nitrogen. In: PAGE, A. L. **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1982, 595-624p.

BROOKES, P. C. et al. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. **Soil Biology and Biochemistry**. v. 17, p. 837-842, 1985. Available from: <[https://doi.org/10.1016/0038-0717\(85\)90144-0](https://doi.org/10.1016/0038-0717(85)90144-0)>. Accessed: Oct. 15, 2021.

CANTARUTTI, R. B. et al. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Editora UFV, 2007, 1017p.

COSTA, E. M.; SILVA, H. F.; RIBEIRO, P. R. A. Matéria orgânica do solo e o seu papel na manutenção e

produtividade dos sistemas agrícolas. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 17; p. 2013.

CURL, E. A.; RODRIGUEZ-KABANA, R. Microbial interections. In: WILKINSON, R.E. **Research methods in weed science**. Atlanta: Southern Weed Science Society, 1972. 162-194p.

DELBEM, F. C. et al. Fontes e doses de adubação nitrogenada na atividade microbiana e fertilidade do solo cultivado com *Brachiaria brizantha*. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, n. 2, p. 361-367, 2011. Available from: <10.4025/actasciagron.v33i2.3946>. Accessed: Oct. 17, 2021.

EIVAZI, F.; TABATABAI, M. Glucosidades and galactosidases in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 20, n. 5, p. 601-606, 1988. Available from: <https://doi.org/10.1016/0038-0717(88)90141-1>. Accessed: Set. 17, 2021.

FABINO NETO, R.. et al. Estudo da consorciação de práticas agropecuárias para o desenvolvimento de sistemas sustentáveis e eficientes na produção de ovinos de corte. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 1108-1129, 2021. Available from: <10.34117/bjdv7n1-075>. Accessed: Set. 26, 2021.

FARIAS, L. N. et al. Características morfológicas e produtivas de feijão-guandu anão cultivado em solo compactado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 497–503, 2013. Available from: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000500005>. Accessed: Set. 17, 2021.

GUIMARÃES, N. F. et al. Biomassa e atividade microbiana do solo em diferentes sistemas de cultivo do cafeeiro. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 1, p. 34-44, 2017. Available from: <https://doi.org/10.19084/RCA16041>. Accessed: Set. 17, 2021..

GONÇALVES, A. C. S. et al. Avaliação dos indicadores biológicos do solo em plantios de palma de óleo, no Município de Santa Bárbara do Pará. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 2, p.6959-6971, 2020. Available from: <10.35587/brj.ed.0000426>. Accessed: Set. 17, 2021.

INÁCIO, A. C. F. et al. Morphophysiological characterization of phosphate solubilizing bacteria from the rhizosphere of non-conventional food plants. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 24547-24565, 2020. Available from: <http://dx.doi.org/10.20546/ijcmas.2016.501.076>. Accessed: Set. 17, 2021.

JAKELAITIS, A. et al. Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 38, p. 118-127, 2008. Available from: <10.5216/pat.v38i2.4171>. Accessed: Set. 17, 2021.

JENKINSON, D. S.; LADD, J. N. Microbial biomass in soil: Measurement and turnover. In: PAUL, E. A.; LADD, J. M. **Soil Biochemistry**. New York: M Decker, 1981, 415-471p.

LANNA, A. C. et al. Atividade de urease no solo com feijoeiro influenciada pela cobertura vegetal e sistemas

de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1933-1939, 2010. Available from: <<https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000600018>>. Accessed: Set. 26, 2021.

LIU, Y. et al. Stochastic processes shape the biogeographic variations in core bacterial communities between aerial and belowground compartments of common bean. **Environmental Microbiology**, v. 23, 2020. Available from: <10.1111/1462-2920.1522>. Accessed: Set. 26, 2021.

MATOSO, S. C. G. et al. Frações de carbono e nitrogênio de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico sob diferentes usos na Amazônia brasileira. **Acta Amazonica**, v. 42, n. 2, p. 231-240, 2012. Available from: <<https://doi.org/10.1590/S0044-59672012000200008>>. Accessed: Set. 26, 2021.

MATSUOKA, M. et al. Biomassa microbiana e atividade enzimática em solos sob vegetação nativa e sistemas agrícolas anuais e perenes na região de Primavera do Leste (MT). **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 27, p. 425-433, 2003. Available from: <<https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000300004>>. Accessed: Set. 26, 2021.

MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria Orgânica do Solo: Métodos de Análises**. Piracicaba: Cio da Terra, 2017. 221p.

MOJENA, R. Hierárquical grouping method and stopping rules: an evaluation. **The Computer Journal**, v. 20, p. 359–363, 1977. Available from: <<https://doi.org/10.1093/comjnl/20.4.359>>. Accessed: Set. 26, 2021.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do solo**. Lavras: Editora UFLA, 2006. 744 p.

NITRO1000 (Inoculantes biológicos). 2020. Available from: <<http://www,nitro1000,com,br/feijao>>. Accessed: Oct. 10, 2020.

OLIVEIRA, A. P. et al. Rendimentos de feijão caupi em função de doses e formas de aplicação de nitrogênio. **Horticultura Brasileira**, v. 21, p. 77-80, 2003. Available from: <<https://doi.org/10.1590/S0102-05362003000100016>>. Accessed: Set. 26, 2021.

PIZZANI, R. et al. Atividade microbiana e indicadores microbiológicos em latossolo vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Enciclopédia Biosfera**, v. 15 n. 28, 2018. Available from: <10.18677/EnciBio_2018B13>. Accessed: Set. 26, 2021. doi: 10.18677/EnciBio_2018B13.

REIS JUNIOR, F. B.; MENDES, I. C. **Biomassa Microbiana do Solo**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2007.

R CORE TEAM. (2021). R Foundation for Statistical Computing. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria. Available from: <<https://www.r-project.org/>>. Accessed: Set. 28, 2021.

ROSCOE, R. et al. Biomassa microbiana do solo: fração mais ativa da matéria orgânica. In: ROSCOE, R., et al. **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas**: modelagem matemática e métodos auxiliares. Dourados: EMBRAPA, 163-198p., 2006.

ROVALINO-CÓRDOVA, A. M. et al. A closer look to cell structural barriers affecting starch digestibility in beans. **Carbohydrate Polymers**, v. 181, 2018. Available from: <<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.11.050>>. Accessed: Set. 26, 2021.

SANTOS, F. C. R. et al. Biological activity in saline sodic soil saturated by water under cultivation of *Atriplex numulária*. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 3, p. 619-627, 2011. Available from: <<https://doi.org/10.1590/S1806-66902011000300007>>. Accessed: Set. 26, 2021.

SELLE, G. L. Ciclagem de Nutrientes em Ecossistemas Florestais. **Bioscience Journal**, v. 23, n. 4, p. 29-39, 2007.

SILVA, E. E et al. **Determinação do carbono da biomassa do solo (BMS-C)**. Seropédica: Embrapa, 2007.

SILVA, E. E. et al. **Determinação do nitrogênio da biomassa do solo (BMS-N)**. Seropédica: Embrapa, 2007.

SILVA, M. O. et al. Qualidade do solo: indicadores biológicos para um manejo sustentável. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 6853-6875, 2021. Available from: <10.34117/bjdv7n1-463>. Accessed: Set. 26, 2021.

SILVA-MATOS, R. R. S. et al. **O Solo na Mitigação e/ou Resolução de Problemas Ambientais**. Ponta Grossa: Atena, 2020.

SILVA, M. et al. Adubação nitrogenada e inoculação com *Rhizobium tropici* na cultura do feijoeiro comum. **Revista cultivando o saber**, v. 11, n. 4, p. 56-63, 2018. Available from: <https://www.fag.edu.br/upload/revista/cultivando_o_saber/5c06b47330c26>. Accessed: Set. 16, 2021.

SMITH, L. J.; PAUL, E. A. The significance of soil microbial biomass estimations. In: BOLLAG, J. M.; STOTZKY, G. (Eds.). *Soil biochemistry*. New York: Dekker, v. 6, p. 357-396, 1990.

SOKAL, R. R.; MICHENER, C. D. **A statistical methods for evaluating systematic relationships**. Kansas University Science Bulletin, v. 38, 1958, 1409-1438p.

SINGH, U. et al. Comparative performance of conservation agriculture vis-a-vis organic and conventional farming, in enhancing plant attributes and rhizospheric bacterial diversity in *Cajanus cajan*: A field study. **European Journal of Soil Biology**, v. 99, 2020. Available from:

<<https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2020.103197>>. Accessed: Set. 16, 2021.

SOUZA, R. et al. Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. **Genetics and Molecular Biology**, v. 38, n. 4, p. 401-419, 2015. Available from: <<https://doi.org/10.1590/S1415-475738420150053>>. Accessed: Set. 26, 2021.

STIVIEN, A.C. et al. Atributos do solo em sistemas diferenciados de uso e manejo do solo em Mato Grosso, MT, Brasil. **Colloquium Agrariae**, v. 16, n. 2, p. 1-15, 2020. Available from: <[10.5747/ca.2020.v16.n2.a354](https://doi.org/10.5747/ca.2020.v16.n2.a354)>. Accessed: Set. 16, 2021.

STOTZKY, G. Microbial respiration. In: BLACK, C.A. **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965, 1550-1572p.

TABATABAI, M.A. Soil enzymes. In: WEAVER, R.W. et al. **Methods of Soil Analysis**. Part 2: Microbiological and Biochemical Properties. Madison: Soil Science Society of America, Wisconsin, 1994, 775–833 p.

TEDESCO, M. J. et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Departamento de Solos UFRGS, 1985.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Departamento de Solos UFRGS, 1995, 174p.

TU, C. et al. Soil microbial biomass and activity in organic tomato farming systems: effects of organic inputs and straw mulching. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 38, n. 2, p. 247-255, 2006. Available from: <<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.05.002>>. Accessed: Set. 16, 2021.

VIEIRA, R. F.; RAMOS, N. P. Atividade enzimática e atividade microbiana em solo com quantidades variadas de palha de Cana-de-açúcar. **Convibra**, p.1-10, 2019.

WU, G.Y. et al. Prenylated stilbenes and flavonoids from the leaves of *Cajanus cajan*. **Chinese Journal of Natural Medicines**, v. 17, n. 5, p. 381-386, 2019. Available from: <[10.1016/S1875-5364\(19\)30044-5](https://doi.org/10.1016/S1875-5364(19)30044-5)>. Accessed: Set. 16, 2021.

WRB/FAO. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports N°. 106. FAO: Rome. Available from: <<http://www.fao.org/3/i3794en/i3794en.pdf>>. Accessed: Dez. 13, 2021.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 19, p. 1467-1476, 1988. Available from: <<https://doi.org/10.1080/00103628809368027>>. Accessed: Set. 16, 2021.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adubação base contribuiu para acréscimos nas características clorofila a e b, taxa fotossintética líquida, altura de plantas e massa seca radicular. A aplicação de N mineral e inoculação do feijão-guandu incrementou o N total do solo. A combinação de adubação e inoculação aumentou a atividade das enzimas β -glicosidase e urease no solo. Os resultados demonstraram que apesar da rusticidade da cultura às condições adversas, há respostas fisiológicas e de melhoria na qualidade biológica do solo ao realizar adubação nitrogenada ou inoculação com *Rhizobium tropici*.

Os genótipos BRS03 e BRS04 de feijão-guandu contribuíram para elevar os teores de carbono orgânico total e microbiano do solo e demonstraram possível potencial para uso na adubação verde.