UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
CAMPUS PROFESSORA CINOBELINA ELVAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DOUTORADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

MARIA DE FÁTIMA MARQUES PIRES

RESPOSTA DO FEIJÃO-CAUPI À APLICAÇÃO DE SAPROLITO E À INOCULAÇÃO BACTERIANA EM LATOSSOLOS COM TEXTURA CONTRASTANTE

Bom Jesus – PI
2026

MARIA DE FÁTIMA MARQUES PIRES

RESPOSTA DO FEIJÃO-CAUPI À APLICAÇÃO DE SAPROLITO E À INOCULAÇÃO BACTERIANA EM LATOSSOLOS COM TEXTURA CONTRASTANTE

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - PPGCA, Campus Professora Cinobelina Elvas - CPCE, da Universidade Federal do Piauí - UFPI, na área de concentração Ciência do Solo, como requisito para obtenção do título de Doutor em Ciências Agrárias.

Orientador: Prof. Dr. Júlio César Azevedo Nóbrega

Bom Jesus – PI

2026

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Setorial Campus Professora Cinobelina Elvas
Setor de Processamento Técnico

P667r Pires, Maria de Fátima Marques.
Resposta do feijão-caupi à aplicação de saprolito e à inoculação bacteriana em latossolos com textura contrastante / Maria de Fátima Marques Pires. -- 2026.
68 f.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Piauí. Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Bom Jesus, Piauí, 2026.
"Orientador: Prof. Dr. Júlio César Azevedo Nóbrega".

1. Ciências agrárias. 2. Agricultura sustentável. 3. Microorganismos benéficos. I. Nóbrega, Júlio César Azevedo. II. Título.

CDD 630

Bibliotecária: Nayra Fontinele Feijão – CRB3/1249

MARIA DE FÁTIMA MARQUES PIRES

RESPOSTA DO FEIJÃO-CAUPI À APLICAÇÃO DE SAPROLITO E À INOCULAÇÃO BACTERIANA EM LATOSSOLOS COM TEXTURA CONTRASTANTE

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - PPGCA, do Campus Professora Cinobelina Elvas - CPCE, da Universidade Federal do Piauí - UFPI, como requisito à obtenção do título de Doutor em Ciências Agrárias.
Área de concentração: Ciência do Solo.
Linha de Pesquisa: Fertilidade, Biologia do Solo e Nutrição de Plantas.
Orientador: Prof. Dr. Júlio César Azevedo Nóbrega.

Aprovada em: 12 de fevereiro de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
JULIO CESAR AZEVEDO NOBREGA
Data: 30/04/2026 17:57:36-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Júlio César A. Nóbrega (UFPI)
Orientador

Documento assinado digitalmente
RAFAELA SIMAO ABRAHAO NOBREGA
Data: 03/05/2026 11:04:07-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. Rafaela S. A. Nóbrega (UFRB)
Examinadora Externa ao Programa

Documento assinado digitalmente
JULIAN JUNIO DE JESUS LACERDA
Data: 03/05/2026 11:25:00-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Julian Junio J. Lacerda (UFPI)
Coorientador

Documento assinado digitalmente
GILVAN BARBOSA FERREIRA
Data: 07/05/2026 09:36:05-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dr. Gilvan B. Ferreira (Embrapa Algodão)
Examinador Externo ao Programa

Documento assinado digitalmente
ELAINE MARTINS DA COSTA
Data: 02/05/2026 16:10:20-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. Elaine Martins da Costa (UFPI)
Examinadora Interna ao Programa

Documento assinado digitalmente
BRUNO TEIXEIRA RIBEIRO
Data: 05/05/2026 15:10:44-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Bruno Teixeira Ribeiro (UFLA)
Examinador Externo ao Programa

À versão de mim que pensou em parar, mas escolheu continuar.

Àquela que duvidou de si, que se cobrou além do que suportava, que enfrentou portas fechadas e dias silenciosos - mas não desistiu!

Àquela que confiou em Deus, quando tudo parecia incerto, protegeu sua fé e decidiu acreditar, mesmo com medo.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, minha eterna gratidão. Foi Ele quem me sustentou quando as forças faltaram, quem me concedeu sabedoria para continuar e fortaleceu minha fé nos momentos mais difíceis. Sua presença constante foi meu amparo e minha direção ao longo de toda essa jornada.

Aos meus pais, pelo amor incondicional e pelas orações que sempre me alcançaram.

Aos meus irmãos, pelos apoios e incentivos contínuos.

Aos meus sobrinhos, por tornarem meus dias mais leves e cheios de alegria.

Aos professores, que contribuíram para este trabalho, meus sinceros agradecimentos. Ao professor Julian, pela ajuda, compreensão e confiança; às professoras Elaine e Rafaela, pelo apoio, orientação e disponibilidade; e ao professor Sammy, pela parceria e contribuições fundamentais.

Ao meu orientador, professor Júlio César, que com sua postura humana, compreensão, poder de escuta e incentivos constantes, fizeram toda a diferença, fortalecendo-me nos momentos difíceis e contribuindo para que eu não desistisse da caminhada longa e desafiadora.

Ao Laboratório de Solos e a toda a equipe (técnicos e demais integrantes do grupo), pelo suporte nas análises, pela convivência e por terem compartilhado não apenas o espaço de trabalho, mas também risadas, aprendizados, desafios e até conflitos. Essas experiências tornaram o ambiente mais descontraído, mesmo após dias cansativos de análises.

Aos meus colegas da pós-graduação, Ingridi, Allana, Paula, Thaís, Helena, Amanda, Gilnair, Jenilton, Paulo, Luis, Adenilson, Ramón e Romário, com quem vivi intensamente essa trajetória, compartilhando desafios e aprendizados.

Aos alunos de graduação, Abiquele, Maicon e Alissandro, pelos apoios na condução dos experimentos e por suas dedicações que tornaram possíveis a realização deste trabalho.

Meu agradecimento especial à Carol, companheira de casa, de pós-graduação e de caminhada. Sua escuta, seu incentivo e sua fé em mim (inclusive, quando eu mesma duvidei) fizeram toda a diferença. Compartilhar essa jornada, ao seu lado, foi um presente.

Ao meu grande amigo Murilo, pelas risadas, pelas ajudas constantes (técnica, braçal e emocional). Sua amizade leve, generosa e engraçada me fortaleceu e, sobretudo, me permitiu ser exatamente quem eu sou.

À CAPES, pela bolsa de estudos concedida.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho se concretizasse. Cada gesto, cada palavra e cada apoio foram fundamentais para que esse sonho se tornasse realidade, pois ninguém chega sozinho a lugar algum.

“Para que todos vejam e saibam, e considerem, e juntamente entendam que a mão do SENHOR fez isso [...]”

Isaías 41:20ª versão JFAA

RESUMO

A busca por uma agricultura sustentável tem incentivado alternativas que reduzam a dependência de fertilizantes minerais. Dentre estas, destacam-se os materiais de origem mineral com potencial de liberação de nutrientes, que promovem a liberação lenta desses nutrientes, melhorando os atributos químicos do solo; e os microrganismos promotores de crescimento, que atuam na solubilização de nutrientes e na fixação biológica de nitrogênio. Objetivou-se com esse trabalho avaliar os efeitos da inoculação bacteriana associada a um material saprolítico do Núcleo de Desertificação de Gilbués, Piauí, Brasil, sobre a fertilidade do solo, o acúmulo de nutrientes e o desenvolvimento do feijão-caupi cultivado em solos de textura e fertilidade contrastantes, como alternativa à adubação mineral. Foram conduzidos dois experimentos, utilizando dois Latossolos Amarelos distróficos com 200 e 443 g kg^{-1} de argila e 59,3% e 16,73% de saturação por bases, respectivamente. O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial 6 x 4, com 4 repetições. Os tratamentos consistiram na combinação de seis condições de cultivo [solo sem adubação (CC1), apenas saprolito (CC2), solo adubado com NPK (CC3), solo adubado com 20 t ha^{-1} de saprolito (CC4), solo adubado com 20 t ha^{-1} de saprolito + solubilizador (CC5) e solo + solubilizador (CC6)] com uso de quatro inoculantes: UFPI CB1-8, UFPI B7-3, CIAT 899 e sem inoculação. No Latossolo franco-arenoso, o tratamento CC3 proporcionou maior crescimento, biomassa e eficiência, enquanto o CC4, associado à estirpe CIAT 899 aumentou significativamente a biomassa em relação ao CC2. No Latossolo argilo-arenoso, o CC3 também se destacou no crescimento e as inoculações com CIAT 899 e UFPI CB1-8, no CC1, elevaram a eficiência da inoculação em relação à condição de cultivo adubada com NPK. Em ambos os solos, a adubação com NPK aumentou os índices de clorofila, enquanto o saprolito apresentou maior efeito sobre o sistema radicular e a nodulação. O material manteve características mineralógicas e químicas que evidenciam seu potencial como fonte de nutrientes para o solo, porém sem refletir em maior acúmulo de nutrientes nas plantas aos 53 dias. O tratamento CC3 foi responsável pelo maior acúmulo de nutrientes nos dois solos. As estirpes bacterianas foram mais eficientes em solos adubados com NPK, enquanto o saprolito mostrou efeito limitado em cultivos de curta duração, sendo sua integração com a inoculação dependente da textura e da fertilidade inicial do solo.

Palavras-chave: Agricultura sustentável, Microrganismos benéficos, Saprolito, *Vigna unguiculata* L. Walp.

ABSTRACT

The search for sustainable agriculture has encouraged alternatives that reduce dependence on mineral fertilizers. Among these, mineral-origin materials with nutrient-release potential stand out, as they promote the slow release of these nutrients, improving the chemical attributes of the soil; as well as plant growth-promoting microorganisms, which act in nutrient solubilization and biological nitrogen fixation. This study aimed to evaluate the effects of bacterial inoculation associated with a saprolitic material from the Desertification Nucleus of Gilbués, Piauí, Brazil, on soil fertility, nutrient accumulation, and the development of cowpea grown in soils with contrasting texture and fertility, as an alternative to mineral fertilization. Two experiments were conducted using two dystrophic Yellow Latosols with 200 and 443 g kg^{-1} of clay and 59.3% and 16.73% base saturation, respectively. The experimental design was completely randomized, in a 6 × 4 factorial scheme, with four replications. The treatments consisted of the combination of six cultivation conditions [soil without fertilization (CC1), saprolite only (CC2), soil fertilized with NPK (CC3), soil fertilized with 20 t ha^{-1} of saprolite (CC4), soil fertilized with 20 t ha^{-1} of saprolite + solubilizer (CC5), and soil + solubilizer (CC6)] with the use of four inoculants: UFPI CB1-8, UFPI B7-3, CIAT 899, and no inoculation. In the sandy loam Latosol, treatment CC3 provided greater growth, biomass, and efficiency, while CC4, associated with strain CIAT 899, significantly increased biomass compared to CC2. In the sandy clay loam Latosol, CC3 also stood out in growth, and inoculations with CIAT 899 and UFPI CB1-8 in CC1 increased inoculation efficiency compared to the NPK-fertilized condition. In both soils, NPK fertilization increased chlorophyll indices, while saprolite had a greater effect on the root system and nodulation. The material maintained mineralogical and chemical characteristics that demonstrate its potential as a nutrient source for the soil, but without resulting in greater nutrient accumulation in plants at 53 days. Treatment CC3 was responsible for the highest nutrient accumulation in both soils.Bacterial strains were more efficient in soils fertilized with NPK, while saprolite showed limited effects in short-term crops, and its integration with inoculation depended on soil texture and initial fertility.

Keywords: Sustainable agriculture, Beneficial microorganisms, Saprolite, *Vigna unguiculata* L. Walp.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Local do experimento..... 22

Figura 2 - Descrição dos tratamentos..... 25

Figura 3 - Efeitos da condição de cultivo e da inoculação sobre o comprimento de raiz e suas interações sobre variáveis de nodulação e crescimento radicular em plantas de feijão-caupi cultivadas em Latossolo franco-arenoso e Latossolo argilo-arenoso, em Bom Jesus-PI..... 30

Figura 4 - Efeitos das condições de cultivo sobre a altura de plantas, diâmetro do caule e número de trifólios em feijão-caupi cultivado em Latossolo franco-arenoso e Latossolo argilo-arenoso, em Bom Jesus-PI..... 31

Figura 5 - Efeitos das condições de cultivo sobre a massa seca de raiz e a área foliar e suas interações sobre a biomassa seca e área foliar do feijão-caupi cultivado em Latossolo franco-arenoso e Latossolo argilo-arenoso, em Bom Jesus-PI..... 32

Figura 6 - Efeitos da condição de cultivo sobre os teores de clorofila em feijão-caupi cultivado em Latossolo franco-arenoso e Latossolo argilo-arenoso, em Bom Jesus-PI..... 34

Figura 7 - Efeitos da condição de cultivo, da inoculação e de suas interações sobre a eficiência, e efeito da interação sobre a eficácia em feijão-caupi cultivado em Latossolo franco-arenoso e Latossolo argilo-arenoso, em Bom Jesus-PI..... 35

Figura 8 - Análise de Componentes Principais (ACP) das variáveis de desenvolvimento do feijão-caupi cultivado em Latossolo franco-arenoso (LFA) e Latossolo argilo-arenoso (LAA), em Bom Jesus-PI..... 36

Figura 9 - Efeito da inoculação sobre a CTC potencial e saturação por bases em Latossolo Amarelo franco-arenoso e teor de cobre em Latossolo Amarelo argilo-arenoso em Bom Jesus-PI..... 39

Figura 10 - Efeito da interação sobre acúmulo de macronutrientes na parte aérea e na raiz e na parte aérea de feijão-caupi cultivado em Latossolo Amarelo franco-arenoso e Latossolo Amarelo argilo-arenoso em Bom Jesus-PI, Brasil..... 41

Figura 11 - Efeito da interação sobre acúmulo de micronutrientes na parte aérea e na raiz de feijão-caupi cultivado em Latossolo Amarelo franco-arenoso e Latossolo Amarelo argilo-arenoso em Bom Jesus-PI, Brasil..... 42
Figura 12 - Efeito da condição de cultivo no acúmulo de fósforo e magnésio na raiz, e zinco na parte aérea de feijão-caupi cultivado em Latossolo Amarelo franco-arenoso e Latossolo Amarelo argilo-arenoso em Bom Jesus-PI, Brasil..... 43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização granulométrica e fertilidade dos solos e do saprolito utilizado nos experimentos, Bom Jesus - PI..... 34

Tabela 2 - Efeito individual da condição de cultivo e da interação entre condições de cultivo com inoculação na fertilidade de Latossolo Amarelo franco-arenoso em Bom Jesus-PI, Brasil..... 37

Tabela 3 - Efeito individual da condição de cultivo e da interação entre condições de cultivo com inoculação na fertilidade de Latossolo Amarelo argilo-arenoso em Bom Jesus-PI, Brasil..... 38

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	**13**
2	**ESTRATÉGIA EXPERIMENTAL**	**15**
3	**REFERÊNCIAL TEÓRICO**	**16**
3.1	**Núcleo de Desertificação de Gilbués, Brasil**	**16**
3.2	**Bactérias promotoras de crescimento vegetal: impactos sobre a fertilidade do solo, a nutrição e o crescimento vegetal**	**17**
3.3	**Fatores bióticos e abióticos que influenciam a interação entre bactérias promotoras de crescimento vegetal e as plantas**	**19**
3.4	**Região do MATOPIBA e o cultivo do feijão-caupi: da cultura tradicional ao cultivo tecnificado**	**20**
4	**MATERIAL E MÉTODOS**	**22**
4. 1	**Local de estudo**	**22**
4. 2	**Caracterização química do saprolito**	**22**
4. 3	**Condições experimentais e tratamentos**	**23**
4. 4	**Variáveis analisadas**	**26**
4. 5	**Análise estatística**	**27**
5	**RESULTADOS**	**29**
6	**DISCUSSÃO**	**44**
7	**CONCLUSÃO**	**52**
	REFERÊNCIAS	**53**
8	**CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS**	**62**
	APÊNDICES	**63**

1 INTRODUÇÃO

O avanço da produção agrícola tem ocorrido graças ao uso contínuo de fertilizantes minerais. Embora esse modelo produtivo venha proporcionando aumentos significativos de produtividade, ele também torna desafiador à sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Logo, torna-se essencial a adoção de estratégias de manejo que promovam melhoria da fertilidade do solo de forma a garantir a sustentabilidade dos sistemas, sobretudo em regiões com solos altamente intemperizados, como os Latossolos que compõem a fronteira agrícola do Matopiba (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia) (Schaefer; Fabris; Ker, 2008). Esses solos apresentam baixa capacidade de troca de cátions, elevada acidez e reduzida disponibilidade de nutrientes, características que tornam a produção agrícola fortemente dependente da aplicação de fertilizantes minerais (Leite *et al*., 2017).

Como estratégia de manejo promissora, destaca-se o uso de saprolito, que são materiais de origem mineral capazes de liberar nutrientes gradativamente, melhorando os atributos químicos e físicos do solo e estimulando a atividade microbiana (Benevides Filho *et al*., 2023). Mesmo apresentando potencial para reduzir a dependência de fertilizantes convencionais, a eficácia desses materiais pode ser limitada por sua lenta taxa de solubilização (Négrel *et al*., 2024), especialmente em culturas de ciclo curto, o que faz com que seu desempenho esteja condicionado a fatores como textura, umidade e atividade biológica do solo.

Neste contexto, a estratégia se estende à interação do uso de microrganismos promotores de crescimento vegetal e do saprolito. Esses microrganismos podem intensificar a solubilização de minerais presentes no saprolito, favorecer a disponibilização de nutrientes, e, no caso das bactérias fixadoras de nitrogênio, reduzir a necessidade de fertilizantes nitrogenados (Imran *et al*., 2021). A interação entre saprolito e microrganismos pode, portanto, acelerar processos que, de forma natural, ocorreriam em escalas de tempo mais longas (Indrapriyadharshini; Karthikeyan; Kannan, 2024).

Apesar desse potencial, os efeitos combinados entre saprolito e microrganismos ainda são pouco compreendidos, sobretudo considerando os fatores que influenciam nessa dinâmica, como a variabilidade textural e os níveis de fertilidade do solo (Singh *et al*., 2018; Rawat *et al*., 2021). Solos arenosos, por exemplo, apresentam menor capacidade de retenção de nutrientes e água, podendo limitar tanto a ação do saprolito quanto a sobrevivência e eficiência de microrganismos inoculados (Al-Shammary *et al*., 2025). Por outro lado, solos mais argilosos oferecem melhorias na retenção de água, mas podem apresentar alta fixação de fósforo (P) (Ulén; Etana, 2014) e limitações químicas (Sale *et al*., 2021) que podem influenciar a resposta

das plantas. Nesse cenário, torna-se relevante utilizar uma cultura com ampla adaptação a diferentes condições de solo para avaliar essas interações.

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp.) pode ser considerado uma cultura promissora para a avaliação do uso de saprolito e da inoculação com bactérias benéficas, devido à sua importância socioeconômica no Nordeste brasileiro, sua adaptação em solos de baixa fertilidade, boa capacidade de aproveitamento de nutrientes, capacidade de estabelecer simbiose com bactérias fixadoras de nitrogênio (N) e solubilizadoras de nutrientes (Santos *et al*., 2017; Souza; Martins; Pedrosa, 2021). Além disso, seu ciclo curto e crescimento inicial rápido permitem identificar, em curto prazo, os efeitos de diferentes condições de cultivo.

Com base nessas perspectivas, a hipótese deste trabalho é que a inoculação bacteriana, associada ao saprolito do Núcleo de Desertificação de Gilbués, potencializa sua solubilização e favorece a liberação de nutrientes, a melhoria da fertilidade do solo e o acúmulo de nutrientes no feijão-caupi, sendo esses efeitos condicionados pelas características texturais do solo. Assim, objetivou-se com esse trabalho avaliar os efeitos da inoculação bacteriana associada a um material saprolítico do Núcleo de Desertificação de Gilbués, Piauí, Brasil, sobre a fertilidade do solo, o acúmulo de nutrientes e o desenvolvimento do feijão-caupi cultivado em solos de textura e fertilidade contrastantes, como alternativa à adubação mineral.

2 ESTRATÉGIA EXPERIMENTAL

A presente tese foi desenvolvida com base em uma abordagem experimental integrada, visando avaliar os efeitos da interação entre um material saprolítico e a inoculação com bactérias promotoras de crescimento vegetal (BPCV) sobre a fertilidade do solo, a dinâmica de nutrientes e o desenvolvimento do feijão-caupi, considerando solos com texturas e níveis de fertilidade contrastantes.

Foram conduzidos dois experimentos em ambiente protegido, utilizando solos representativos do Matopiba, selecionados para representar texturas e fertilidade contrastantes, permitindo avaliar a influência do solo na resposta do feijão-caupi à aplicação do saprolito e à inoculação bacteriana.

O material saprolítico do Núcleo de Desertificação de Gilbués foi previamente caracterizado quanto a sua composição química, utilizando-se o método de espectrometeia portátil de fluorescência de raios X (pXRF).

A inoculação bacteriana envolveu as estirpes dos seguintes gêneros: *Rhizobium, Bacillus* e *Paenibacillus*, com capacidade de atuação em diferentes processos promotores de crescimento vegetal, visando potencializar a liberação de nutrientes e o crescimento das plantas de feijão-caupi.

Além dos tratamentos com material saprolítico e inoculação bacteriana, foram incluídos no experimento tratamentos com adubação convencional**,** seguindo as recomendações para a cultura do feijão-caupi, conforme análise química do solo e exigências nutricionais da cultura.

O delineamento experimental inteiramente ao acaso com os tratamentos em arranjo fatorial permitiu a avaliação dos efeitos isolados e combinados do saprolito e da inoculação, por meio da análise da fertilidade do solo, do estado nutricional das plantas, das variáveis biométricas e de indicadores da eficiência de uso de nutrientes ao longo do desenvolvimento do feijão-caupi.

A tese foi organizada em formato de texto corrido, estruturando de forma integrada os fundamentos teóricos, os procedimentos metodológicos e a discussão dos resultados obtidos. Inicialmente, são apresentados os aspectos conceituais relacionados ao uso de material saprolítico no solo, à atuação de microrganismos promotores de crescimento vegetal e ao cultivo do feijão-caupi na região do Matopiba. Em seguida, são descritos os experimentos conduzidos e discutidos os resultados referentes ao desenvolvimento das plantas, à dinâmica da fertilidade do solo e às respostas nutricionais, considerando os efeitos do uso do material saprolítico, da inoculação bacteriana e da adubação NPK.

3 REFERÊNCIAL TEÓRICO

3.1 Núcleo de Desertificação de Gilbués, Brasil

O município de Gilbués está localizado no sudoeste do estado do Piauí (9°52'29"S e 45°20'46"W) e integra uma área representativa de degradação ambiental, sendo reconhecida pelo Ministério do Meio Ambiente como um dos quatro Núcleos de Desertificação do Nordeste juntamente com Irauçuba (CE), Seridó (PB) e Cabrobó (PE) (Brasil, 2007).

As condições climáticas exercem forte influência sobre a dinâmica ambiental local. O clima é caracterizado como tropical seco, com precipitação média anual em torno de 1.300 mm, concentrada entre os meses de janeiro e maio, e temperatura média anual de aproximadamente 35 °C, variando entre mínimas de 22 °C e máximas de 40 °C (Nunes *et al.,* 2012). Essas condições, aliadas à irregularidade das chuvas, contribuem para a intensificação dos processos erosivos na região.

Do ponto de vista geológico, a área está inserida na Bacia Sedimentar do Parnaíba, com predomínio de rochas do Grupo Areado (Aguiar; Gomes, 2004; Brasil, 2006) e da Formação Quiricó (Campos; Dardene, 1997). Nessas formações, destacam-se a presença de argilas expansíveis do tipo 2:1 (Sgarbi, 1991) e elevados teores de matéria orgânica nas porções mais baixas da paisagem, enquanto nas áreas mais elevadas das chapadas há influência de arenitos e siltitos intemperizados da Formação Três Barras (Sgarbi, 2000).

A cobertura vegetal predominante na região é o Cerrado *stricto sensu* (França; Piuzana; Ross, 2017), que, quando degradado, favorece o avanço dos processos erosivos. No Núcleo de Desertificação de Gilbués, a degradação do solo inicia-se com erosão laminar, evoluindo para a formação de sulcos e formas mais intensas de erosão, resultando na remoção das camadas superficiais, que são mais ricas em nutrientes (Crepani, 2009).

Em relação aos atributos pedológicos, os solos apresentam baixo grau de intemperismo, mantendo forte relação com o material de origem. Além disso, possuem limitações de drenagem e características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas que aumentam sua suscetibilidade à erosão hídrica (Valladares; Ribeiro Júnior; Aquino, 2020).

3.2 Bactérias promotoras de crescimento vegetal: impactos sobre a fertilidade do solo, a nutrição e o crescimento vegetal

As BPCV constituem um grupo funcional de microrganismos associados às plantas capazes de colonizar a rizosfera, a superfície radicular (rizoendófitos) ou o interior dos tecidos vegetais (endófitos) (Díaz-Rodríguez *et al*., 2024). Esses microrganismos desempenham papéis essenciais na interface solo-planta, modulando processos fisiológicos, bioquímicos e ecológicos que resultam em melhorias do crescimento, da nutrição e da produtividade vegetal (Chauhan *et al*., 2023). A eficácia das BPCV deriva de mecanismos diretos, relacionados à oferta e assimilação de nutrientes e à regulação hormonal, e indiretos, que envolvem proteção contra estresses e promoção da saúde do solo (Murtaza *et al*., 2023).

Entre os microrganismos mais estudados dentro desse grupo, destacam-se os dos gêneros *Bacillus*, *Paenibacillus* e *Rhizobium*, que reúnem características amplamente reconhecidas por seus benefícios agronômicos. Espécies dos gêneros *Bacillus* e *Paenibacillus* destacam-se pela capacidade de solubilizar fosfatos insolúveis, seja por mecanismos que envolvem a liberação de ácidos orgânicos ou a mobilização de compostos de fosfato de cálcio (Ca). Ambas também produzem ácido indolacético, contribuindo para o crescimento e expansão do sistema radicular (Costa *et al*., 2013; Costa *et al.*, 2016). Já o gênero *Rhizobium*, além de apresentar as características mencionadas anteriormente, é amplamente conhecido pela elevada eficiência na fixação biológica de N em leguminosas (Marra *et al*., 2011; Longatti; Marra; Moreira, 2013).

Essas características se alinham diretamente aos principais mecanismos diretos das BPCV, que incluem a fixação biológica de N, a solubilização de fosfatos insolúveis e a mobilização de potássio (K), ferro (Fe) e outros micronutrientes por meio da secreção de ácidos orgânicos, enzimas e sideróforos, bem como a produção de fitormônios como auxinas, citocininas e giberelinas que regulam a divisão celular, a elongação radicular e o desenvolvimento da parte aérea (Imran *et al*., 2021). Soma-se a isso a síntese de ACC deaminase, enzima que diminui os níveis de etileno, hormônio ligado à inibição do crescimento sob estresses abióticos, favorecendo maior expansão radicular (Gamalero; Lingua; Glick, 2023). Esses processos, em conjunto, resultam em maior eficiência de absorção de nutrientes, tanto pela modulação da arquitetura das raízes quanto pelo aumento da disponibilidade de elementos na rizosfera (Saleem *et al*., 2018).

Pode-se observar também efeitos indiretos das BPCV, como a mitigação de estresses bióticos, por meio da produção de compostos antimicrobianos, sideróforos e lipopeptídeos,

além da indução de respostas de resistência sistêmica nas plantas (Sheoran *et al*., 2025). Na esfera dos estresses abióticos, como seca, salinidade e toxicidade por metais pesados, as BPCV aumentam a tolerância vegetal ao modular rotas metabólicas, reduzir o acúmulo de espécies reativas de oxigênio e favorecer ajustes osmóticos. Esses mecanismos ampliam a resiliência das plantas, especialmente em ambientes degradados ou de baixa fertilidade (Rahim *et al*., 2025).

Estudos recentes indicam que a aplicação de bactérias tolerantes à seca pode efetivamente mitigar esses efeitos adversos, aumentando a resiliência e a produtividade das plantas. No estudo de Nader *et al.* (2024), por exemplo as bactérias tolerantes à seca melhoraram significativamente o crescimento e a produção da soja sob estresse hídrico nos estágios críticos R3 e R5, aprimorando características como comprimento do broto, teor de clorofila e absorção de nutriente. Além disso, o estudo de Zirak-Qoturbulagh *et al*. (2025) mostrou que a co-inoculação com *Bradyrhizobium japonicum* e fungos micorrízicos arbusculares, melhorou significativamente a tolerância à seca da soja, aumentando o rendimento das sementes.

No solo, as BPCV contribuem diretamente para a melhoria da fertilidade biológica ao intensificar a ciclagem de nutrientes, promover a mineralização da matéria orgânica, aumentar a estabilidade de agregados e favorecer interações sinérgicas com fungos micorrízicos e outros microrganismos benéficos (Imran; Ortas, 2025). A integração desses processos resulta em maior vigor vegetativo, melhor eficiência fotossintética, aumento da massa radicular e incrementos de produtividade observados em culturas, como milho, soja, cana-de-açúcar, hortaliças e frutíferas (Miglani *et al*., 2021). Nesse contexto, no estudo de Rao, Ashwin e Bagyaraj (2025), a aplicação conjunta de bactérias, NPK, fungos micorrízicos arbusculares e biochar promoveu crescimento significativo de mudas de tomate, observando-se maiores comprimentos de caule e raiz, além de incrementos no diâmetro do caule, no índice de massas fresca e seca, evidenciando maior acúmulo de biomassa e vigor das plantas.

Resultados semelhantes foram observados em experimento de campo conduzido com alface, no qual a adubação inorgânica associada ou não à inoculação com o fungo micorrízico arbuscular *Glomus intraradices* e com a rizobactéria promotora de crescimento vegetal *Pseudomonas mendocina* promoveram aumentos significativos da biomassa da parte aérea e radicular, elevaram as concentrações foliares de P e Fe e aumentaram a porcentagem de agregados estáveis do solo, enquanto apenas *P. mendocina* incrementou significativamente a atividade da desidrogenase, indicando maior atividade microbiana do solo (Kohler *et al.,* 2006).

3.3 Fatores bióticos e abióticos que influenciam a interação entre bactérias promotoras de crescimento vegetal e as plantas

A eficiência da interação entre BPCV e plantas depende de uma série de fatores bióticos e abióticos que condicionam tanto a sobrevivência dos microrganismos no solo quanto sua capacidade de colonizar as raízes e expressar seus mecanismos benéficos (Abd-Elgawad; Askary, 2020). Entre os fatores abióticos, os atributos do solo exercem papel central (Singh *et al*., 2018). A fertilidade química, especialmente os teores de nutrientes como N, P, K, Ca, Mg e micronutrientes, influenciam diretamente a necessidade e a resposta das plantas aos mecanismos promovidos pelas BPCV. Solos muito pobres em P, por exemplo, tendem a favorecer a atuação de bactérias solubilizadoras de fosfatos, enquanto solos deficientes em N aumentam a relevância das diazotróficas não simbióticas (Rawat *et al*., 2021).

A textura do solo também exerce efeitos marcantes. Solos arenosos, com baixa retenção de água e fertilidade natural reduzida, apresentam maior variabilidade térmica e menor proteção física para microrganismos, o que pode limitar a sobrevivência e a capacidade de colonização das BPCV (Al-Shammary *et al*., 2025). Por outro lado, solos argilosos oferecem maior superfície de adsorção e micro-habitats propícios, embora possam limitar a difusão de oxigênio — fator crítico para bactérias aeróbias. A matéria orgânica, além de fornecer fontes de carbono, favorece a formação de agregados, aumentando a estabilidade dos microambientes e protegendo as populações microbianas contra oscilações ambientais (Li *et al*., 2023).

Outros fatores abióticos importantes incluem: o pH, que regula a solubilidade de nutrientes e a atividade enzimática microbiana; a umidade do solo, que afeta a mobilidade e a colonização da rizosfera; e a temperatura, que modula o metabolismo das bactérias (Qiqige *et al*., 2025). Condições extremas, como salinidade elevada ou toxicidade por alumínio (Al) podem limitar a atividade microbiana, embora algumas BPCV apresentem estratégias de tolerância que mitigam esses efeitos (Rahim *et al*., 2025).

Entre os fatores bióticos, destaca-se a composição das comunidades microbianas nativas, que pode atuar sinergicamente ou competir com as BPCV (Garciglia-Mercado *et al*., 2024). Além disso, características intrínsecas da planta, como exsudação radicular, estágio fenológico, arquitetura do sistema radicular e genótipo, influenciam fortemente o estabelecimento da bactéria (Iannucci *et al.,* 2021; Robert *et al*., 2025). Plantas com maior produção de exsudatos ricos em compostos carbonados tendem a favorecer microrganismos benéficos. A compatibilidade ecológica entre a espécie bacteriana e o hospedeiro vegetal é fundamental para que os efeitos positivos se manifestem plenamente (Chauhan *et al*., 2023).

Plantas diferentes liberam compostos orgânicos específicos (açúcares, aminoácidos, ácidos orgânicos e fenilpropanoides) que agem como sinais químicos responsáveis pela atração, seleção e estabelecimento das BPCV na rizosfera (Chen *et al*., 2024). Além disso, a morfologia radicular influencia a área disponível para colonização e a profundidade de exploração, afetando a distribuição espacial dos microrganismos (Yang *et al*., 2023).

As interações microbianas no solo também interferem no desempenho das BPCV, seja por meio de competição por nichos e recursos, seja pela formação de consórcios benéficos com fungos micorrízicos arbusculares, actinobactérias e outros simbiontes positivos. Esses consórcios podem potencializar efeitos como a solubilização de P, a absorção de água e a resistência a estresses ambientais (Vishwakarma *et al*., 2020).

Dessa forma, o sucesso das BPCV depende da sinergia entre diversos fatores. Logo, essa compreensão é fundamental para estratégias de manejo que visem maximizar a eficiência desses bioinsumos em diferentes sistemas produtivos, inclusive em regiões estratégicas do agronegócio brasileiro, como o Matopiba, onde o uso de tecnologias sustentáveis tem ganhado destaque (Basso; Neves; Grossi-de-Sá, 2024).

3.4 Região do MATOPIBA e o cultivo do feijão-caupi: da cultura tradicional ao cultivo tecnificado

A região do Matopiba é formada por parte dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, abrangendo cerca de 73 milhões de hectares, sendo considerada uma das últimas fronteiras agrícolas do Brasil (Araújo *et al*., 2024). Localizada no bioma Cerrado e com forte transição para áreas de Caatinga e Amazônia, a região apresenta clima tropical sazonal, solos predominantemente de textura arenosa a média, com baixa fertilidade natural, porém, com alta aptidão para mecanização e uso de tecnologias modernas. Entre as principais culturas cultivadas encontram-se a soja, milho, algodão, arroz, feijão-caupi, além de sistemas de integração lavoura-pecuária (Schaefer *et al*., 2025).

O desenvolvimento agrícola da região tem se intensificado nas últimas décadas, impulsionado pelo avanço das tecnologias de manejo do solo, correção da acidez, fertilização, uso de cultivares adaptadas e pela crescente adoção da agricultura de precisão, além da expansão das áreas de sequeiro em planaltos elevados (Gomes *et al*., 2019). Esses fatores têm contribuído para maior produtividade e eficiência dos sistemas agrícolas. Entretanto, ainda coexistem áreas conduzidas pela agricultura familiar e por sistemas tradicionais de cultivo, especialmente nas partes mais baixas e próximas a cursos d’água, onde a adoção de tecnologias

é mais limitada e o manejo permanece baseado em práticas convencionais (Dogliotti *et al*., 2014).

O feijão-caupi tem grande relevância socioeconômica no Matopiba. Tradicionalmente cultivado em áreas baixas e úmidas, em sistemas consorciados ou de mínima intervenção, o feijão-caupi tem papel fundamental na segurança alimentar (Cardoso; Melo; Ribeiro**,** 2018). Nos últimos anos, entretanto, o grão passou a ocupar áreas de Cerrado alto, em sistemas mecanizados, como cultura principal ou de sucessão após soja ou milho. A adoção de tecnologias, como sementes melhoradas, inoculação bacteriana, estratégica de fertilização, irrigação suplementar e manejo fitossanitário, tem permitido aumento da produtividade e expansão comercial (Ferraz-Almeida; Mota, 2021)

A modernização do cultivo tem transformado o feijão-caupi em uma cultura ainda mais estratégica, não apenas por seu papel fundamental na produção de alimentos, mas também por sua contribuição decisiva para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas do Matopiba (Lambers *et al*., 2020). Essa importância se deve à sua elevada capacidade de realizar simbiose com bactérias fixadoras N, reduzindo a necessidade de fertilizantes nitrogenados; ao seu efeito positivo na melhoria da estrutura e da fertilidade do solo, favorecendo a infiltração de água e o aumento da matéria orgânica; e, sobretudo, à sua notável adaptação a condições de estresse hídrico e térmico, típicas da região do Matopiba (Imran *et al*., 2021). Assim, o feijão-caupi se consolida como uma cultura chave, tanto para a segurança alimentar, quanto para o fortalecimento de sistemas produtivos mais resilientes e ambientalmente eficientes no Matopiba (Lambers *et al*., 2020).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Local de estudo

O estudo foi conduzido em um ambiente protegido com tela de sombreamento de 50%, proporcionando sombreamento parcial e proteção às plantas, sem controle de temperatura ou umidade, na Universidade Federal do Piauí (UFPI), Campus Professora Cinobelina Elvas (CPCE), no município de Bom Jesus, PI (Figura 1), entre maio e agosto de 2024. Durante todo o experimento, a temperatura mínima registrada foi de 14,6°C e a máxima de 38,2°C.

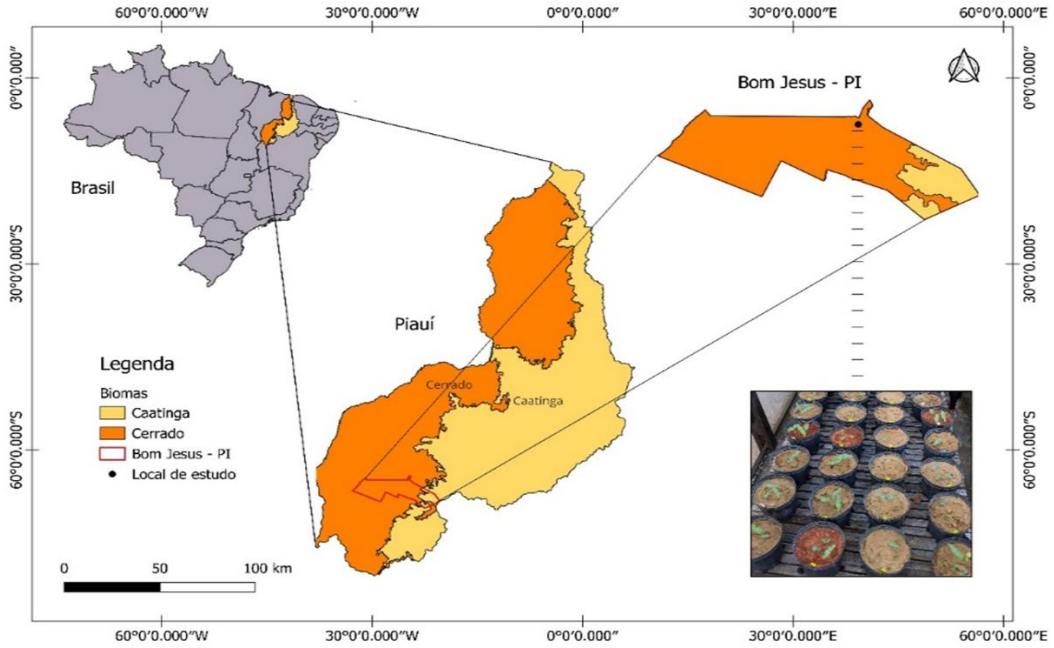


Figura 1 - Local do experimento. Universidade Federal do Piauí, Bom Jesus, Piauí, Brasil. Fonte: autores.

4.2 Caracterização química do saprolito

O material saprólito é proveniente de solos do Núcleo de Desertificação de Gilbués, Brasil. Inicialmente, o material foi previamente caracterizado quanto a sua composição química, utilizando-se o método de pXRF. As análises de pXRF foram realizadas conforme o Método 6200 da USEPA (USEPA, 2007) e Weindorf e Chakraborty (2016), com pequenas adaptações. Resumidamente, uma amostra do saprolito foi peneirada em malha de 2 mm e seca em estufa a 60 °C por duas semanas. Em seguida, foi colocada em recipientes de amostragem com um filme fino de Mylar® no fundo. Os recipientes foram posicionados na abertura do pXRF e escaneados utilizando um S1 Titan 600 LE no modo *Geochem–Dual soil* (Bruker,

Billerica, MA, EUA). O espectrômetro contém um tubo de ródio (4 W, 15–50 keV e 5–100 μA) e um detector de deriva de silício com resolução <145 eV. A amostra foi analisada em 4 repetições. Os limites de detecção informados pelo fabricante são: Al e Si (0,4 g kg^{-1}); P e Cl (50 mg kg^{-1}); K, Ca, Ti e V (25 mg kg^{-1}); Cr (10 mg kg^{-1}); Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Y, Zr, Ba, Ta, Pb, Bi, Ce (5 mg kg^{-1}).

Para o controle e garantia de qualidade (QA/QC), foram utilizados brancos, amostras de verificação Bruker e materiais de referência certificados do *National Institute of Standards and Technology* (NIST) (2709a, 2710a e 2711a) para determinar a recuperação elementar [(concentração reportada pelo pXRF / concentração certificada) × 100] (Silva *et al*., 2021). As taxas de recuperação (%) das amostras de controle Bruker foram: Al_2O_3 (97), K_2O (90), SiO_2 (94), Cu (98), Fe (90), Mn (89), Ni (102), Pb (100). As taxas de recuperação (%) para os padrões NIST foram: Al_2O_3 (108), CaO (115), K_2O (80), SiO_2 (95), As (99), Ba (65), Cr (95), Cu (96), Fe (73), Mn (71), Ni (75), Pb (113), Rb (94), Sr (106), Ti (96), Zn (92), Zr (104).

Como resultado da composição química elementar, verificaram-se os seguintes valores: MgO (1,95%), Al_2O_3 (9,43%), SiO_2 (43,27%), Fe (3,77%), P (0,021%), K_2O (2,95%), Ca (0,78%), Ti (0,37%), Cr (53 mg kg^{-1}), Mn (593 mg kg^{-1}), Co (53 mg kg^{-1}), Ni (29,5 mg kg^{-1}), Cu (21,25 mg kg^{-1}), Zn (69,5 mg kg^{-1}), As (6,25 mg kg^{-1}), Rb (133,25 mg kg^{-1}), Sr (54,5 mg kg^{-1}), Y (45,75 mg kg^{-1}), Zr (424,25 mg kg^{-1}), Nb (9 mg kg^{-1}), Ba (593,75 mg kg^{-1}), Pb (17,5 mg kg^{-1}), Th (15,75 mg kg^{-1}) e U (21,5 mg kg^{-1}).

4.3 Condições experimentais e tratamentos

Dois experimentos simultâneos foram conduzidos em solos caracterizados como Latossolo Amarelo distrófico (Santos *et al*., 2018) e como Oxisol, de acordo com o Soil Survey Staff (2022). As amostras foram coletadas na profundidade de 0–0,20 m no município de Bom Jesus, Piauí, Brasil.

Para as avaliações das condições de fertilidade, as amostras foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas em malha de 2 mm. Os atributos de fertilidade foram determinados conforme a metodologia descrita por Teixeira *et al*. (2017), na qual foram avaliados, em cada amostra: pH em água; acidez trocável (Al^{3+}), extraída com KCl 1 mol L^{-1} e quantificada por titulação com hidróxido de sódio 0,025 mol L^{-1}; acidez potencial (H + Al), determinada pela solução SMP; fósforo (P) e potássio (K^+), extraídos pelo método Mehlich-1 e determinados por colorimetria e fotometria de chama, respectivamente; cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}), extraídos com KCl 1 mol L^{-1} e determinados por espectrofotometria de absorção atômica.

A partir dos valores de K^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Al^{3+} e H + Al, foram calculados os seguintes índices: soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica potencial (T), saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m). A textura do solo foi determinada pelo método da pipeta e, para obtenção da matéria orgânica do solo (MOS), o teor de carbono orgânico total (COT) foi determinado pelo método úmido, utilizando dicromato de potássio em meio sulfúrico, tendo como fonte de energia o calor liberado pelo ácido sulfúrico e/ou aquecimento. A partir do teor de COT, o percentual de matéria orgânica foi calculado multiplicando-se o resultado de COT pelo fator 1,724.

A principal diferença entre os dois experimentos foi a composição granulométrica e a fertilidade inicial de cada solo. O solo do primeiro experimento apresentou teor de argila de 200 g kg^{-1} (franco-arenoso) e maior saturação por bases (V% = 59,3), enquanto o solo do segundo experimento apresentou teor de argila de 443 g kg^{-1} (argilo-arenoso) e menor saturação por bases (V% = 16,73).

Tabela 1- Caracterização granulométrica e fertilidade dos solos e do saprolito utilizado nos experimentos, Bom Jesus – PI.

Atributos	Latossolo Amarelo distrófico		Saprolito
	Franco-arenoso	Argilo-arenoso	
pH	6,10	4,37	8,26
V (%)	59,30	16,73	98,40
H+Al	1,30	3,50	0,64
Al^{3+} (cmolc dm^{-3})	0,0	1,25	0,0
Ca^{2+} (cmolc dm^{-3})	1,18	0,40	30,90
Mg^{2+} (cmolc dm^{-3})	0,65	0,12	7,63
SB (cmolc dm^{-3})	1,90	0,70	39,0
T (cmolc dm^{-3})	3,20	4,20	39,70
P (mg kg^{-1})	25,6	3,3	281,0
K (mg kg^{-1})	30,0	70,2	190,0
m (%)	0,0	64,2	0,0
MOS (%)	1,60	1,17	0,03
Argila (g kg^{-1})	200	443	343
Silte (g kg^{-1})	22	45	300
Areia (g kg^{-1})	778	512	357

V: saturação por base, H+Al: acidez potencial, Al: alumínio, Ca: cálcio, Mg: magnésio, SB: soma de bases, T: CTC pH 7, P: fósforo, K: potássio m: saturação por alumínio e MOS: Matéria orgânica do solo.

Ambos os experimentos foram conduzidos em delineamento inteiramente casualizado, em arranjo fatorial 6 × 4, com 4 repetições. O primeiro fator correspondeu às condições de

cultivo com adubação, e o segundo fator à inoculação, totalizando 96 unidades experimentais em cada experimento. A descrição dos tratamentos está apresentada na Figura 2**.**

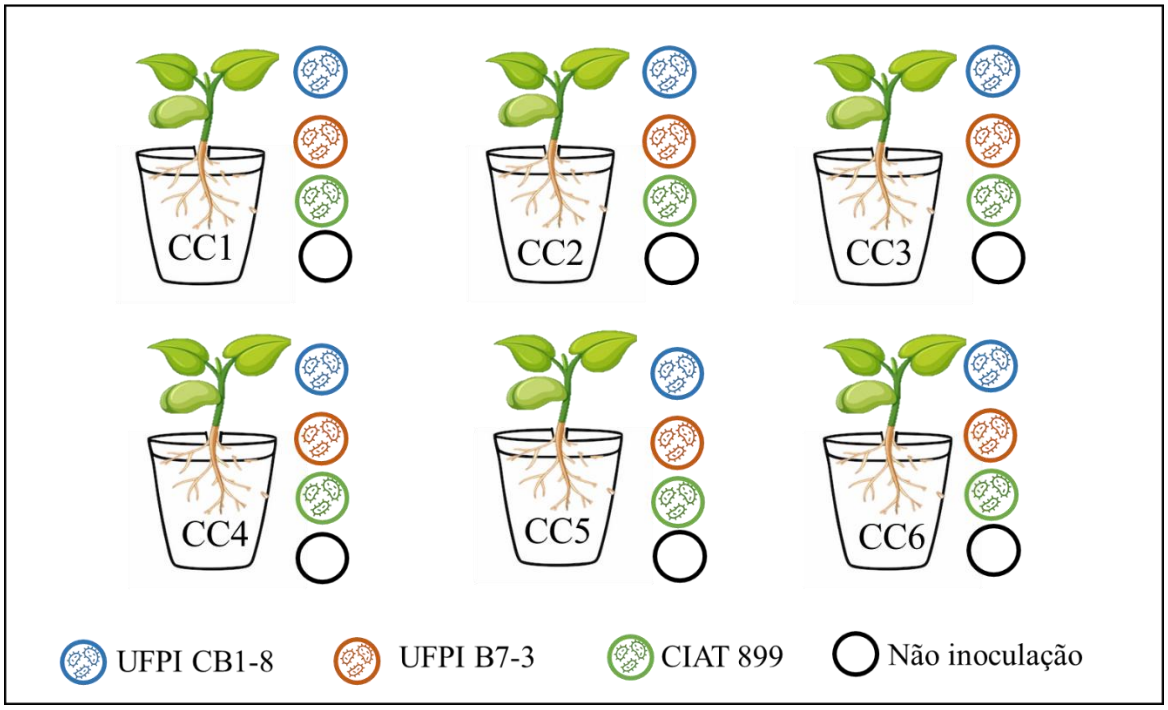


Figura 2 - Descrição dos tratamentos. Seis condições de cultivo com fertilização: solo sem adubação (CC1), apenas saprólito (CC2), solo adubado com NPK (CC3), solo adubado com 20 t ha^{-1} de saprólito (CC4), solo adubado com 20 t ha^{-1} de saprólito + solubilizador (CC5) e solo + solubilizador (CC6); e quatro níveis de inoculação.

Cada unidade experimental correspondeu a um vaso contendo 10 kg de solo. Nos tratamentos em que o solo foi totalmente substituído pelo saprolito, também foram utilizados 10 kg do material por vaso, enquanto nos tratamentos em que o saprolito foi adicionado aos solos como fonte de nutrientes, a dose aplicada foi equivalente a 20 t ha^{-1}. A condição de adubação CC1 e na ausência de inoculação foi neste trabalho considerada a testemunha absoluta.

As práticas de correção e fertilização foram realizadas de acordo com as recomendações de Ribeiro *et al*. (1999). Para a correção do solo, foi utilizado calcário dolomítico em pó, com o objetivo de elevar a saturação por bases para 70,0%, exceto nos vasos com apenas saprolito (CC2). Nos tratamentos com adubação NPK (CC3), as fontes de nitrogênio (N), fósforo (P_2O_5) e potássio (K_2O) foram, respectivamente, ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio. As doses aplicadas variaram de acordo com a textura do solo: 20-40-20 kg ha^{-1} para o solo franco-arenoso e 20-80-20 kg ha^{-1} para o solo argilo-arenoso.

Em cada vaso, foram semeadas quatro sementes de feijão-caupi, cultivar BRS Guariba. Aos 18 dias após a semeadura, foi realizado o desbaste, deixando-se apenas uma planta por

vaso. Antes da semeadura, as sementes passaram por um processo de desinfecção, sendo imersas em álcool 98% por três minutos, seguidas de hipoclorito de sódio a 1% pelo mesmo período e, posteriormente, lavadas sucessivamente com água destilada.

Para a preparação do inoculante, as cepas foram cultivadas em meio líquido 79 (Fred; Waksman, 1929), agitando-se a 110 rpm e 28 °C por cinco dias em agitador orbital. A inoculação foi realizada no dia do plantio via semente, utilizando-se 1 mL de inoculante por semente (com concentração aproximada de 1×10^8 células bacterianas mL^{-1}).

As cepas utilizadas foram UFPI CB1-8 (Bacillus sp.), UFPI B7-3 (*Paenibacillus* sp.) e CIAT 899 (*Rhizobium tropici*). As cepas UFPI CB1-8 e UFPI B7-3 foram isoladas de feijão-caupi e atuam como solubilizadoras de P e produtoras de ácido indol-3-acético (IAA) (Costa *et al*., 2013; Costa *et al*., 2016). A CIAT 899, por sua vez, é uma cepa de referência para fixação biológica de N em feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) e também apresenta potencial para produção de IAA e solubilização de P (Marra *et al*., 2011).

Nos tratamentos com solubilizadores, o produto utilizado foi SolubPhos®, desenvolvido com os isolados BRM 119 (*Bacillus megaterium*) e BRM 2084 (*Bacillus subtilis*), que atuam na solubilização de P inorgânico e mineralização de P orgânico. O produto é especialmente recomendado para o cultivo da soja, conforme especificações do fabricante, com dose indicada de 100 mL para cada 50 kg de sementes.

Durante todo o período experimental, a irrigação foi manejada para manter o solo em 60% da capacidade de campo do vaso. O nível de capacidade de campo foi determinado de acordo com a metodologia de Casaroli e van Lier (2008).

4.4 Variáveis analisadas

As avaliações foram realizadas quando as plantas se encontravam em pleno florescimento (53 dias após a semeadura). O crescimento das plantas foi analisado com a medição da altura da planta (AP), do diâmetro do caule (DC) e do número de trifólios (NT) por planta. A área foliar (AF) foi determinada utilizando-se um medidor de área foliar com scanner. Os índices relativos de clorofila *a* e *b*, foram estimados por meio de um clorofilômetro portátil, considerando os valores médios das folhas completamente expandidas, enquanto o índice relativo de clorofila total (IRCt) foi obtido a partir do somatório das clorofilas *a* e *b*.

Para caracterização do desenvolvimento radicular foram determinados o comprimento da raiz (CR) e o volume da raiz (VR), utilizando um scanner de raiz para digitalização de imagem. Posteriormente as imagens foram inseridas no software WinRHIZO, obtendo se a

estimativa de CR e VR. A nodulação foi avaliada por meio da contagem do número total de nódulos (ND) e da determinação da massa seca dos nódulos (MSN), previamente secos em estufa com circulação de ar a 65 °C até massa constante.

A biomassa das plantas foi avaliada por meio da massa seca da parte aérea (MSPA), massas seca da raiz (MSR) e massa seca total (MST) sendo as amostras secas em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C até atingirem massa constante.

Além dessas variáveis, foram analisados os parâmetros de eficácia (em relação à testemunha absoluta) e eficiência (em relação à condição de cultivo adubada com NPK) na produção de biomassa com uso ou não dos inoculantes testados, considerando a resposta das plantas às condições experimentais. Para calcular a eficácia e eficiência, utilizou-se a fórmula de Bergersen *et al.* (1971), seguindo se as equações 1 e 2, respectivamente.

$$\text{Eficácia} = \frac{(\text{MSPA inoculada}) * 100}{(\text{MSPA da testemunha absoluta})} \qquad \text{Equação 1}$$

$$\text{Eficiência} = \frac{(\text{MSPA inoculada}) * 100}{(\text{MSPA da planta adubada com N mineral})} \qquad \text{Equação 2}$$

Foram coletadas amostras da parte aérea e das raízes para a determinação do acúmulo de nutrientes. No mesmo período, realizou-se a coleta de uma amostra de solo em cada unidade experimental, destinada à análise de fertilidade.

A determinação dos atributos de fertilidade do solo foi realizada segundo Teixeira *et al*. (2017), conforme procedimentos já descritos anteriormente. Nas plantas, o teor dos nutrientes foi obtido a partir da análise química do tecido vegetal para os elementos: N; P; K; Ca; Mg; Cu; Fe; Mn e Zn. Os métodos utilizados para analisar os nutrientes foram: digestão seca, sendo os nutrientes determinados pelos seguintes métodos: N – método Kjeldahl; P – método colorimétrico; K – fotômetro de chama; Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn – leitura em absorção atômica; (Miyazawa *et al.,* 2009). O acúmulo de cada nutriente na parte aérea e na raiz foi estimado a partir do teor do nutriente presente em cada amostra, multiplicado pela massa seca da parte aérea e da raiz respectivamente.

4.5 Análise estatística

Com auxílio do software RStudio (R Core Team, 2023) os dados obtidos foram submetidos ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk) .Os dados do experimento conduzido no solo franco-arenoso, referentes às variáveis teor de Al^{3+}, saturação por alumínio (m%), teores

de Cu, Fe e Zn no solo e acúmulo de Cu e Mn nas raízes, não apresentaram distribuição normal dos resíduos. Por essa razão, esses dados foram transformados pela raiz quadrada de (y + 0,5). A transformação também foi necessária para as variáveis teor de Al^{3+}, saturação por alumínio (m%) e acúmulo de Cu, Mn e Zn nas raízes no experimento realizado em solo argilo-arenoso.

Em seguida, realizou-se a análise de variância (ANOVA) para avaliar o efeito dos tratamentos. Quando significativo realizou-se o teste de agrupamentos de médias Scott-Knott a 5% de probabilidade. Os gráficos foram construídos com o auxílio do SigmaPlot 14.5. Foi realizada uma análise de componente principal (PCA) conjunta entre os dois exprimentos para verificar a relação entre os fatores estudados e as variáveis de crescimento, produção de massa, indíces de clorofila, nodução, eficácia e eficiência nos dois solos, com auxílio do software PAST versão 4.17 (Hammer; Harper; Ryan, 2001).

5 RESULTADOS

As interações entre as diferentes condições de cultivo da adubação e as inoculações influenciaram ($p<0,05$) o número de nódulos (NN), a massa seca de nódulos (MSN) e o volume de raiz (VR) nos experimentos com feijão-caupi cultivado em solo franco-arenoso e argilo-arenoso (Figura 3 e Apêndices 1 e 4). No solo argilo-arenoso, a interação também se estendeu à variável comprimento de raiz (CR), indicando que a resposta morfofisiológica do sistema radicular foi influenciada de forma conjunta pelas condições de cultivo e pelas inoculações (Figura 3).

Por outro lado, no solo franco-arenoso verificou-se efeito isolado, tanto das condições de cultivo, quanto da inoculação sobre o CR, sugerindo que, nessa textura, os fatores atuaram de maneira independente na determinação do CR (Figura 3).

No solo franco-arenoso, para o ND, MSN e VR, observaram-se maiores valores nos tratamentos com NPK (CC3), especialmente quando associados às estirpes UFPI CB1-8 e UFPI B7-3. Em relação ao ND, a estirpe UFPI CB1-8 apresentou valores semelhantes nas plantas cultivadas somente no solo sem adubação (CC1) e naquelas adubadas com NPK, com médias de 62 e 61 nódulos, respectivamente (Figura 3A). No entanto, a MSN foi significativamente superior quando houve adubação com NPK (Figura 3C).

Quanto ao VR, verificou-se que a inoculação com as estirpes UFPI CB1-8 e UFPI B7-3, embora tenha proporcionado maiores valores, não exerceu efeito adicional significativo em comparação à ausência de inoculação (Figura 3G). No solo franco-arenoso, os tratamentos com NPK e o inoculado com UFPI CB1-8, induziram os maiores valores de CR (66,62 cm planta^{-1}, 57,02 cm planta^{-1}, respectivamente).

No solo argilo-arenoso, os maiores valores de CR e VR foram obtidos nos tratamentos com NPK, especialmente na ausência da inoculação, com médias de 41,73 cm de CR (Figura 3F) e 10,35 cm³ planta^{-1} de VR (Figura 3H). Para o NN e a MSN**,** destacaram-se os tratamentos somente com uso do saprolito (CC2) e sem inoculação, com valores de 35 nódulos e 0,012 g planta^{-1} de MSN. Entretanto, para a MSN, a ausência de inoculação não diferiu ($p>0,05$) das estirpes UFPI CB1-8 e CIAT 899.

Para as variáveis de crescimento, o tratamento com NPK apresentou o melhor desempenho em ambos os solos, resultando, no solo franco-arenoso, em altura de plantas (AP) de 25,46 cm (Figura 4A), diâmetro do caule (DC) de 4,84 mm (Figura 4C) e número de trifólios (NT) de 5,0 trifólios (Figura 4E).

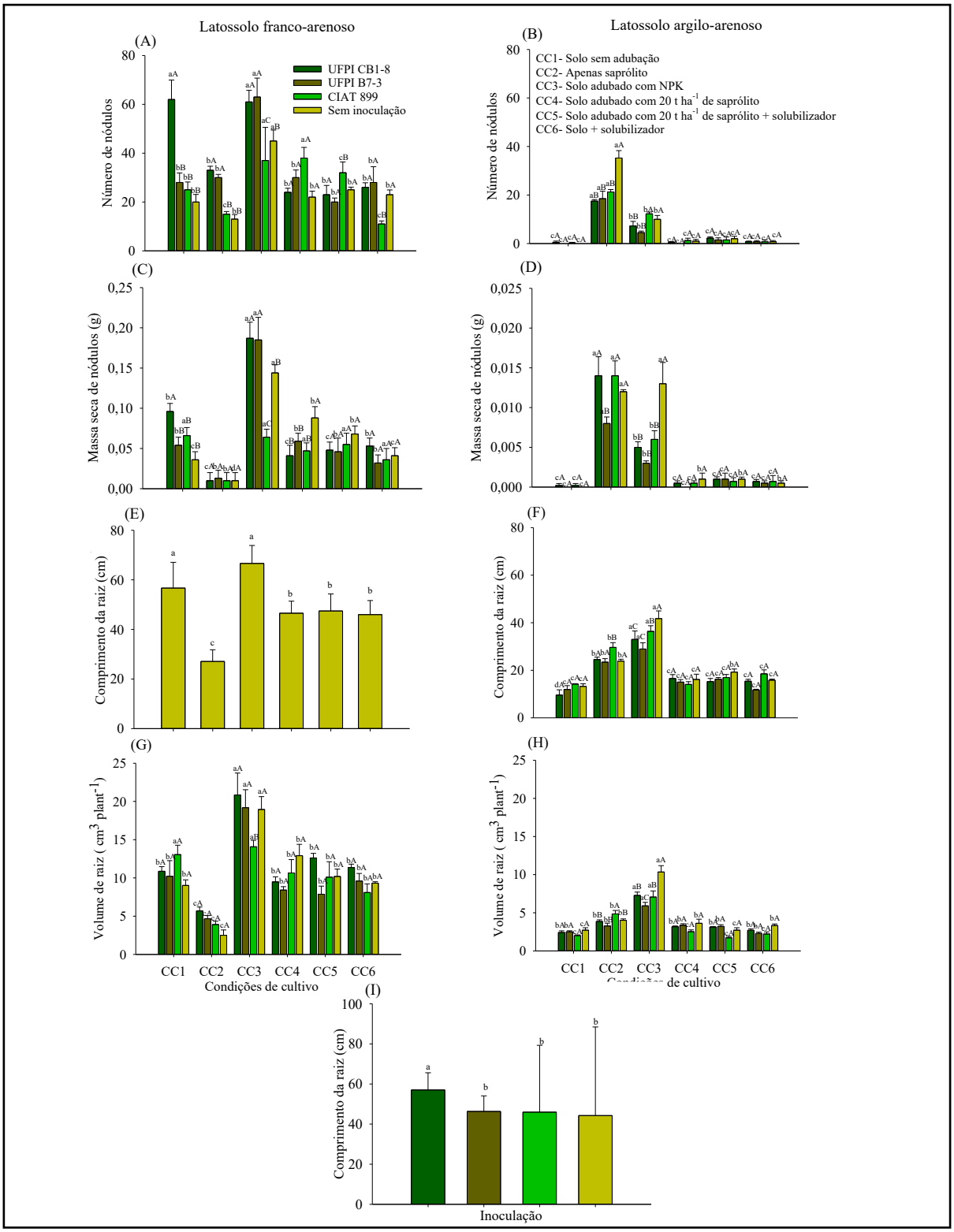


Figura 3 - Efeitos das condições de cultivo e das inoculações sobre o comprimento de raiz (E, I) e suas interações sobre o número de nódulos (A, B), massa seca de nódulos (C, D), comprimento de raiz (F) e volume radicular (G, H) em plantas de feijão-caupi cultivadas em Latossolo franco-arenoso (A, C, E, G, I) e Latossolo argilo-arenoso (B, D, F, H), em Bom Jesus-PI. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não

diferem entre si para inoculações e, pela mesma letra minúscula, para as condições de cultivo (teste de Scott-Knott, $p < 0,05$).

No solo argilo-arenoso, o mesmo tratamento proporcionou plantas com AP de 19,46 cm (Figura 4B), DC de 3,76 mm (Figura 4D) e NT de 4,0 trifólios (Figura 4F). No entanto, no solo franco-arenoso, o tratamento somente com solo (CC1) apresentou médias estatisticamente semelhantes às obtidas no solo com NPK (CC3) para todas essas variáveis.

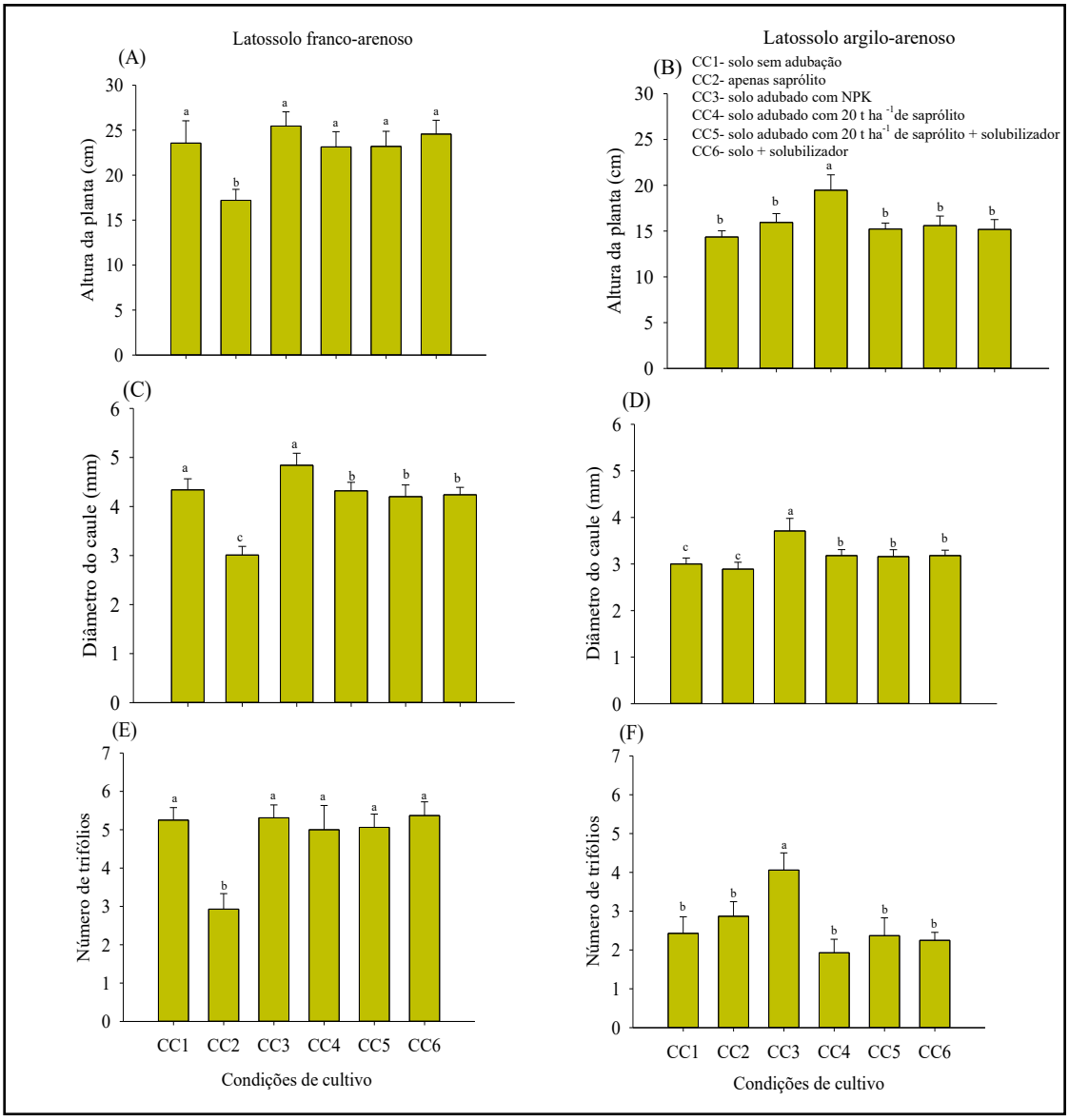


Figura 4 - Efeitos das condições de cultivo sobre a altura de plantas (A, B), diâmetro do caule (C, D) e número de trifólios (E, F) em feijão-caupi cultivado em Latossolo franco-arenoso (A, C, E) e Latossolo argilo-arenoso (B, D, F), em Bom Jesus-PI. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si (teste de Scott-Knott, $p < 0,05$).

No solo de textura argilo-arenosa, houve interação entre as condições de cultivo e inoculação, para a massa seca da parte aérea (MSPA) massa seca da raiz (MSR), massa seca total (MST) e área foliar (AF) (Figura 5). Por outro lado, no solo de textura franco-arenosa, essa

interação foi detectada apenas para MSPA e MST, enquanto para MSR e AF verificou-se efeito isolado das condições de cultivo da adubação (Figura 5).

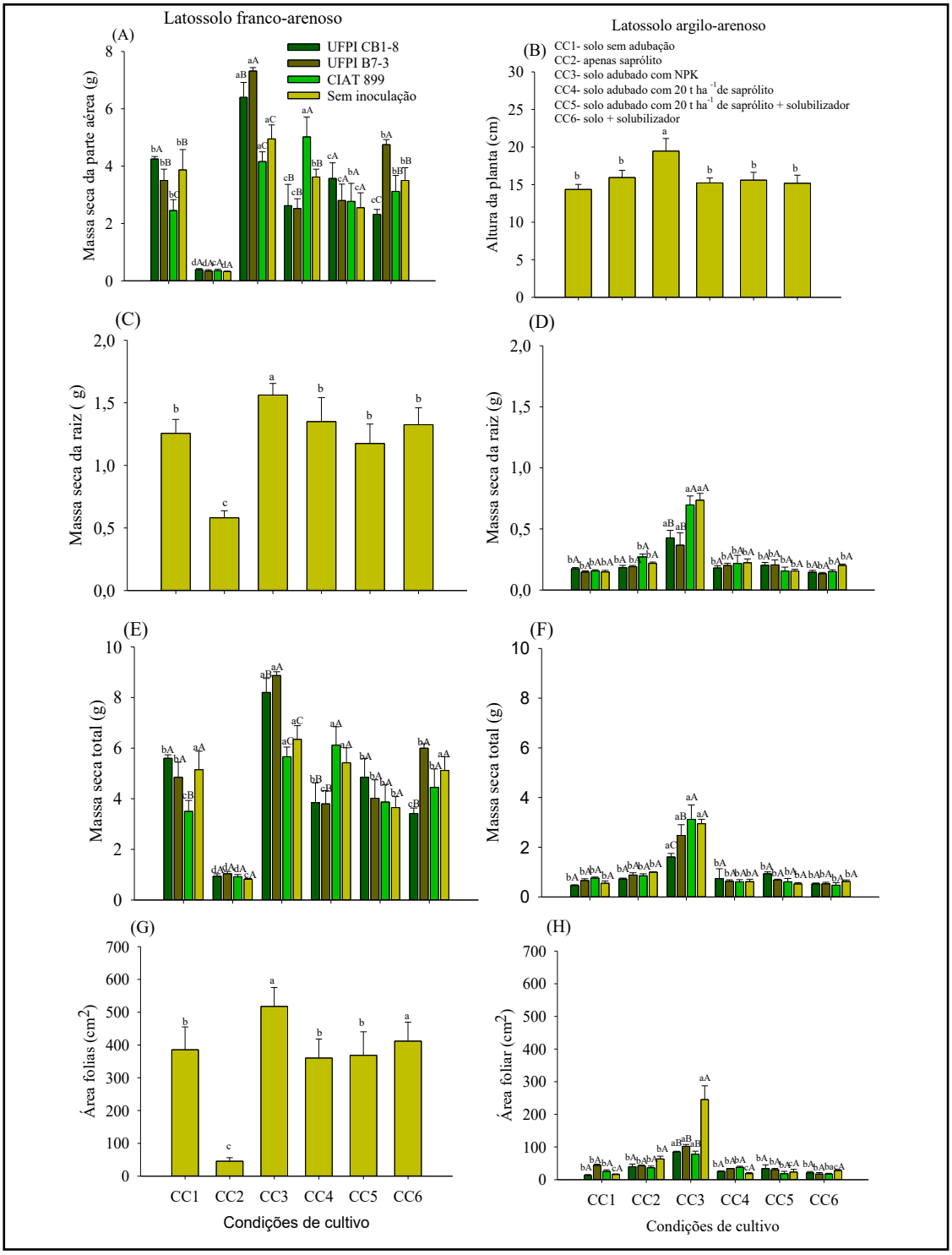


Figura 5 - Efeitos das condições de cultivo sobre a massa seca de raiz (C) e a área foliar (G) e suas interações sobre a massa seca da parte aérea (A, B), massa seca de raiz (D), massa seca total (E, F) e área foliar (H) em feijão-caupi cultivado em Latossolo franco-arenoso (A, C, E, G) e Latossolo argilo-arenoso (B, D, F, H), em Bom Jesus-PI. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si entre as inoculações, e letras minúsculas indicam ausência de diferença entre as condições de cultivo (teste de Scott-Knott, $p < 0,05$).

No solo franco–arenoso para a MSPA e MST (Figura 5A e 5E), os maiores valores foram observados nos tratamentos com NPK, especialmente quando associados à inoculação com a estirpe UFPI B7-3, que se destacou com produção de 7,32 g planta^{-1} de MSPA e 8,87 g planta^{-1} de MST. Já no solo argilo-arenoso, a inoculação com a estirpe CIAT 899 destacou-se, proporcionando médias de 2,42 g planta^{-1} para MSPA (Figura 5B), 3,12 g planta^{-1} para MST (Figura 5F). Contudo, esses valores não diferiram estatisticamente daqueles observados na ausência de inoculação, cujos valores médios foram de 2,21 g planta^{-1} para MSPA (Figura 5A), 2,95 g planta^{-1} para MST (Figura 7B)

O tratamento com NPK apresentou o melhor desempenho no solo franco-arenoso para as variáveis AF e MSR, com valores de 517,82 cm² (Figura 5G) e 1,562 g planta^{-1} (Figura 5C), respectivamente. Esses resultados evidenciam a relevância do fornecimento de N, P e K para o estímulo ao desenvolvimento do feijão-caupi nesse tipo de solo.

No solo argilo-arenoso, a adubação com NPK, sem inoculação, promoveu aumento significativo da AF, alcançando 245,26 cm² (Figura 5H). Resultado semelhante foi observado para a MSR, em que o tratamento com NPK apresentou 0,736 g planta^{-1}, não diferindo estatisticamente do tratamento com adubação associada à inoculação com a estirpe CIAT 899, que resultou em 0,697 g planta^{-1} (Figura 5D).

No solo franco-arenoso, observou-se interação significativa entre as condições de cultivo da adubação e da inoculação apenas para a clorofila a, enquanto no solo argilo-arenoso, esse teor foi influenciado de forma individual pela condição de cultivo. Para ambos os solos, efeito individual da condição de cultivo da adubação foi também verificado para o teor de clorofila *b* e total (Figura 6).

Em solo franco-arenoso, as plantas cultivadas somente com saprolito e sem inoculação, apresentaram o menor índice relativo de clorofila *a* (27,67), diferindo das demais condições, que não apresentaram diferenças entre si (Figura 6A). Já no solo argilo-arenoso, os tratamentos com NPK e o com solubilizador (CC6) se destacaram com maior valor de clorofila a e total, e de clorofila *b* para o NPK (Figura 6F). A aplicação somente do saprolito no franco-arenoso contribuiu para menores valores de clorofila *b* e total (Figura 6C e E) em relação aos demais tratamentos.

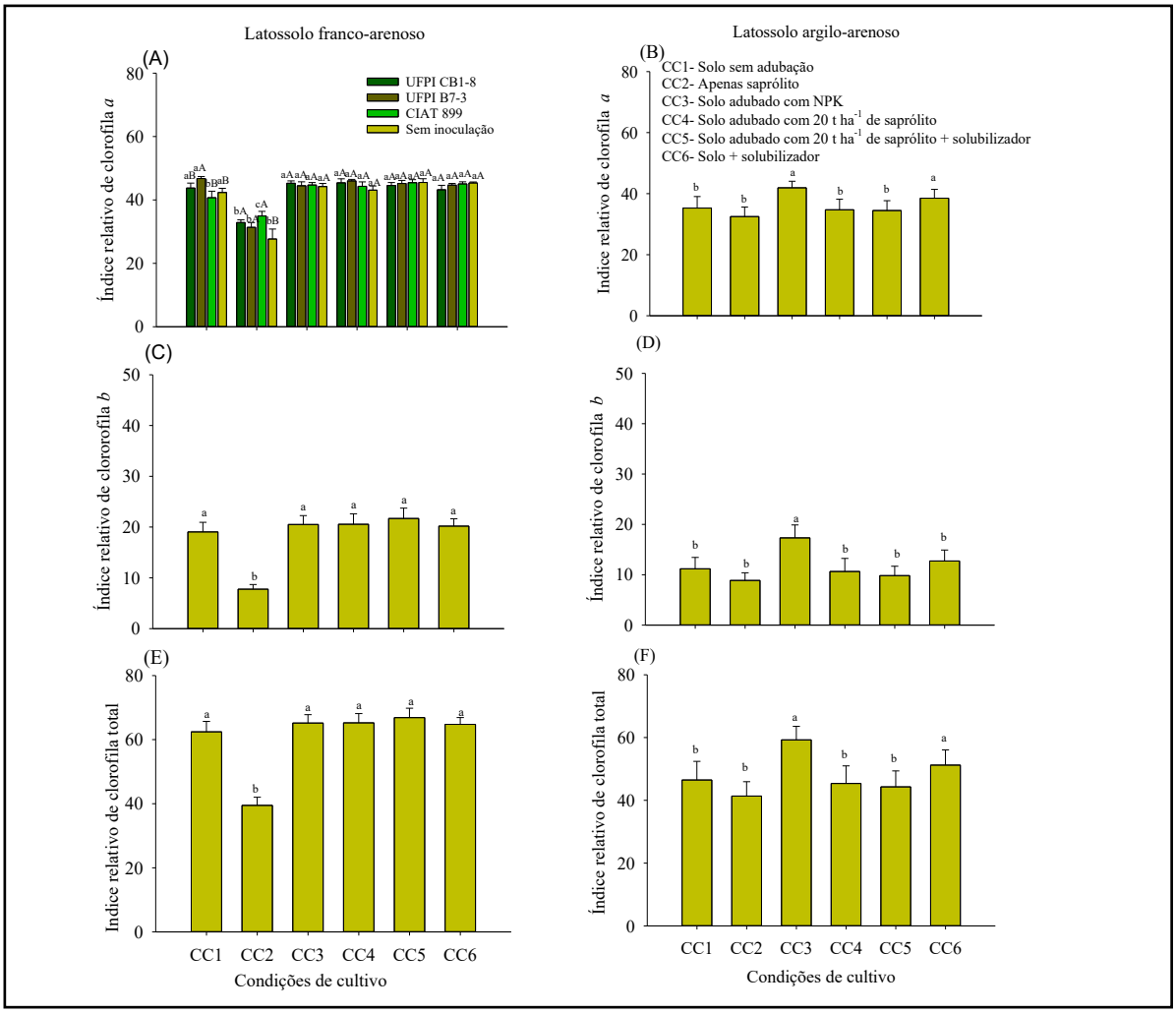


Figura 6 - Efeitos da condição de cultivo sobre o índice de clorofila *a* (B), índice de clorofila *b* (C, D) e índice de clorofila total (E, F), e do efeito da interação sobre o índice de clorofila *a* (A), em feijão-caupi cultivado em Latossolo franco-arenoso (A, C, E) e Latossolo argilo-arenoso (B, D, F), em Bom Jesus-PI. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si entre as inoculações, e letras minúsculasindicam ausência de diferença entre as condições de cultivo (teste de Scott-Knott, $p < 0,05$).

No solo franco-arenoso, houve efeito isolado das condições de cultivo da adubação e da inoculação sobre a eficiência relativa de cada fator em estudo. Já no solo argilo-arenoso, a interação entre esses fatores influenciou significativamente a eficiência e a eficácia de cada fator estudado (Figura 7).

No solo franco-arenoso, a condição de cultivo com NPK possibilitou a maior eficiência relativa em relação aos demais condição de cultivo (Figura 7A). A inoculação também promoveu incrementos expressivos, destacando-se, além da estirpe UFPI CB1-8, a estirpe CIAT 899, que proporcionaram eficiências de 83,63% e 82,73%, respectivamente (Figura 7C), quando comparado com o tratamento MSPA com NPK, sem inoculação.

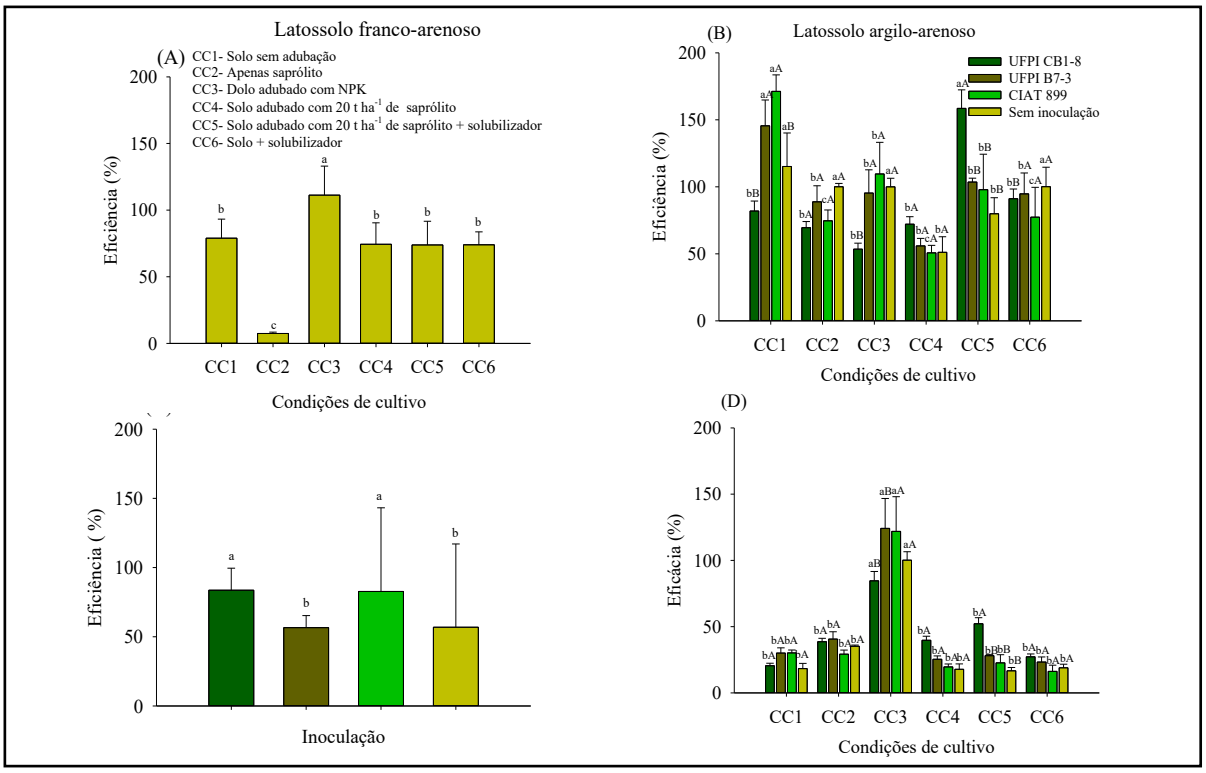


Figura 7 - Efeitos da condição de cultivo, da inoculação e de suas interações sobre a eficiência (A, C, B) e efeito da interação sobre a eficácia (D) em feijão-caupi cultivado em Latossolo franco-arenoso (A, C) e Latossolo argilo-arenoso (B, D), em Bom Jesus-PI. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si entre as inoculações, e letras minúsculas indicam ausência de diferença entre as condições de cultivo (teste de Scott-Knott, $p < 0,05$).

No solo argilo-arenoso, verificou-se efeito significativo da interação entre os fatores sobre a eficiência da inoculação sobre a aplicação NPK e a eficácia da inoculação sobre a testemunha (Figura 7) dos fatores em estudos. Quanto à eficiência, no solo sem adubação (CC1), as estirpes UFPI B7-3 e CIAT 899 alcançaram 145,58% e 171,22%, correspondendo a aumentos de 30,41% e 56% em relação à ausência de inoculação. Na condição CC5, a estirpe UFPI CB1-8 destacou-se com 158,56% de eficiência (Figura 7B). Em relação à eficácia, sob adubação NPK, a CIAT 899 apresentou o maior valor (121,90%), embora sem diferença ($p>0,05$) em relação à ausência de inoculação (100,16%) (Figura 7D).

A Análise de Componentes Principais (PCA) realizada com as variáveis de crescimento do feijão-caupi cultivado nos solos franco-arenoso e argilo-arenoso evidenciou a contribuição dessas variáveis para a distinção entre os fatores estudados. Os dois primeiros componentes principais explicaram, em conjunto, 84,32% da variabilidade total dos dados, sendo o PCA 1 responsável por 65,46% e o PCA 2 por 18,86% (Figura 8).

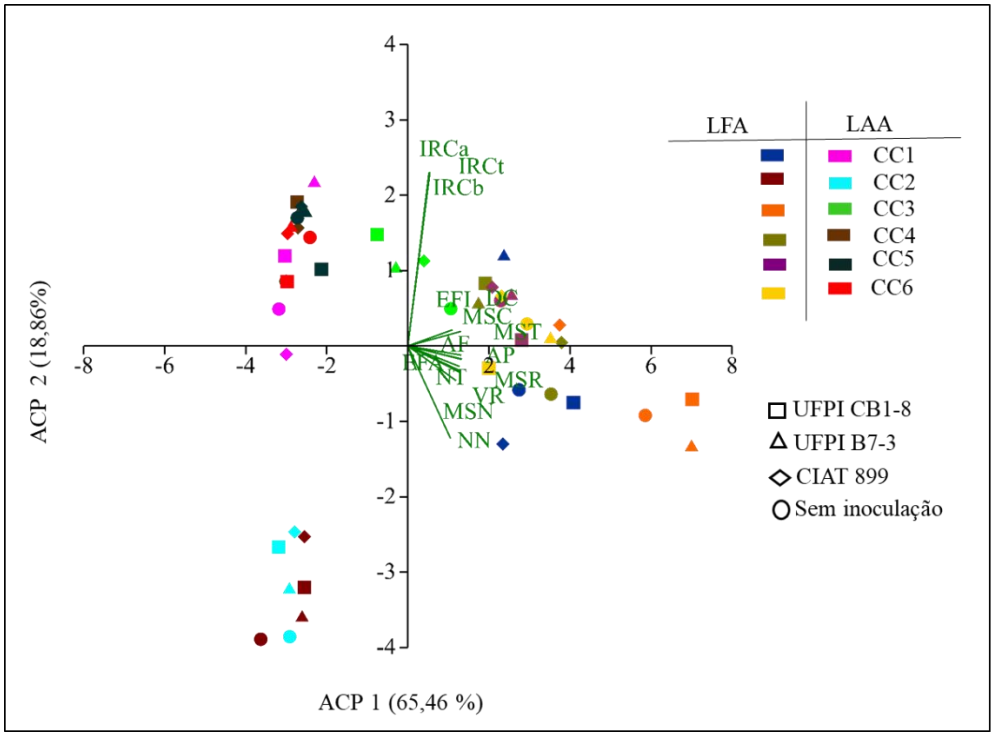


Figura 8 - Análise de Componentes Principais (ACP) das variáveis de desenvolvimento do feijão-caupi cultivado em Latossolo franco-arenoso (LFA) e Latossolo argilo-arenoso (LAA), em Bom Jesus-PI. Variáveis: índice relativo de clorofila total (IRCt), índice relativo de clorofila a (IRCa), índice relativo de clorofila b (IRCb), diâmetro do caule (DC), altura de planta (AP), número de trifólios (NT), área foliar (AF), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca de raiz (MSR), massa seca total (MST), volume de raiz (VR), comprimento de raiz (CR), número de nódulos (NN), massa seca de nódulos (MSN), eficiência (EFI) e eficácia (EFA). Condições de cultivo: solo sem adubação (CC1), somente saprolito (CC2), solo adubado com NPK (CC3), solo adubado com 20 t ha^{-1} de saprolito (CC4), solo adubado com 20 t ha^{-1} de saprolito + solubilizador (CC5) e solo + solubilizador (CC6); e quatro tratamentos de inoculação.

A análise estatística dos dados de fertilidade do solo apresentou interação entre as condições de cultivo e a inoculação bacteriana no solo franco-arenoso para os atributos pH, Ca^{2+}, Al^{3+}, H + Al, SB e m% (Tabela 2 e Apêndice 2). Já no solo argilo-arenoso (Tabela 3 e Apêndice 5), a interação influenciou os teores de Ca^{2+}, K^{+}, P, SB, CTC e MOS. Para as demais variáveis de fertilidade, o efeito significativo foi observado apenas em função da condição de cultivo nos dois solos (Tabela 2 e 3 e Apêndices 2 e 5).

Tabela 2 - Efeito individual da condição de cultivo e da interação entre condições de cultivo com inoculação na fertilidade de Latossolo Amarelo franco-arenoso em Bom Jesus-PI, Brasil.

	Mg^{2+}	K^{+}	CTC	P	Cu	Mn	Fe	Zn	V	MOS
	---------$cmol_c\ dm^{-3}$---------			----------$mg\ dm^{-3}$----------					%	$g\ gk^{-1}$
CC1	0,35b	0,04a	2,97c	7,14c	0,25a	5,35c	1079,23b	0,79c	52,79d	0,12c
CC2	4,95a	0,31a	42,55a	10,04c	0,00d	18,62a	13,80c	0,00e	97,34a	0,05d
CC3	0,18c	0,05b	2,93c	65,07a	0,18b	5,51c	1423,80a	0,93b	55,61c	0,16b
CC4	0,44b	0,07b	4,95b	18,09b	0,03c	10,48b	1200,55b	0,56d	84,80b	0,17b
CC5	0,42b	0,08b	5,13b	20,03b	0,00d	18,81a	1133,28b	1,01b	86,19b	0,19a
CC6	0,29c	0,06b	2,68c	9,88c	0,02c	8,85b	1372,98a	1,32ª	50,06e	0,17b

	pH (H_2O)				Ca^{2+} ($cmol_c\ dm^{-3}$)			
	UFPI CB1-8	UFPI B7-3	CIAT 899	Sem inoculação	UFPI CB1-8	UFPI B7-3	CIAT 899	Sem Inoculação
CC1	5,5dA	5,5cA	5,3cA	5,5dA	1,3cA	1,1cA	1,0cA	1,1cA
CC2	8,7aA	9,0aA	8,8aA	8,9aA	38,4aA	35,9aB	34,0aC	36,1aB
CC3	5,1eA	5,2cA	5,1cA	5,1eA	1,4cA	1,3cA	1,3cA	1,4cA
CC4	6,6cB	6,8bB	6,8bB	7,3bA	3,7bA	3,2bA	3,1bA	4,8bA
CC5	7,2bA	7,0bA	7,0bA	7,0cA	4,0bA	3,9bA	3,8bA	3,8bA
CC6	5,5dA	5,3cA	5,3cA	5,4dA	1,1cA	1,0cA	0,8cA	0,8cA

	Al^{3+} ($cmol_c\ dm^{-3}$)				H+Al ($cmol_c\ dm^{-3}$)			
	UFPI CB1-8	UFPI B7-3	CIAT 899	Sem inoculação	UFPI CB1-8	UFPI B7-3	CIAT 899	Sem Inoculação
CC1	0,37aA	0,25aA	0,25aA	0,12cB	1,39aA	1,41aA	1,41aA	1,36aA
CC2	0,0cA	0,0bA	0,0bA	0,0cA	0,84cC	1,35aA	1,12bB	1,18bB
CC3	0,25aA	0,21aA	0,25aA	0,37aA	1,12bB	1,34aA	1,36aA	1,34aA
CC4	0,06cA	0,0bA	0,0bA	0,0cA	0,79cA	0,69bA	0,70cA	0,63cA
CC5	0,0cA	0,00bA	0,0bA	0,0cA	0,70cA	0,71bA	0,70cA	0,68cA
CC6	0,15bB	0,25bA	0,25aA	0,18bB	1,26aA	1,30aA	1,32aA	1,41aA

	SB ($cmol_c\ dm^{-3}$)				m (%)			
	UFPI CB1-8	UFPI B7-3	CIAT 899	Sem Inoculação	UFPI CB1-8	UFPI B7-3	CIAT 899	Sem Inoculação
CC1	1,7cA	1,6cA	1,4cA	1,52A	15,5aA	13,4aA	14,9aA	7,2bB
CC2	43,8aA	41,2aB	39,1aC	41,5aB	0,0cA	0,0bA	0,0bA	0,0cA
CC3	1,7cA	1,5cA	1,5cA	1,7cA	13,0a	15,6a	13,9a	14,7a
CC4	4,2bA	3,6bA	3,5bA	5,4bA	1,8cA	0,0bA	0,0bA	0,0cA
CC5	4,5bA	4,4bA	4,3bA	4,4bA	0,0cA	0,0bA	0,0bA	0,0cA
CC6	1,5cA	1,4cA	1,2cA	1,1cA	8,6bB	15,2aA	15,2aA	16,5aA

V: saturação por base, H+Al: acidez potencial, Al: alumínio, Ca: cálcio, Mg: magnésio, SB: soma de bases, CTC: capacidade de troca catiônica a pH 7, P: fósforo, K: potássio, Cu: cobre, Mn: manganês, Fe: ferro, Zn: zinco, m: saturação por alumíno e MOS: Matéria orgânica do solo. CC1: solo sem adubação, CC2: apenas saprólito, CC3: solo adubado com NPK, CC4: solo adubado com 20 t ha^{-1} de saprólito, CC5: solo adubado com 20 t ha^{-1} de saprólito + solubilizador, CC6: solo + solubilizador. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5%.

Tabela 3 - Efeito individual da condição de cultivo e da interação entre condições de cultivo com inoculação na fertilidade de Latossolo Amarelo argilo-arenoso em Bom Jesus-PI, Brasil.

	pH	H+Al	Mg^{2+}	Cu	Mn	Fe	Zn	V
	(H_2O)	--------$cmol_c\ dm^{-3}$-------		----------mg dm^{-3}----------				%
CC1	6,4c	2,4a	0,54b	1,06a	4,56c	91,25b	1,21a	54,37e
CC2	8,8a	0,70c	4,58a	0,01d	23,43a	2,19c	0,09c	97,94a
CC3	6,3c	1,46b	0,41b	1,10a	6,79c	109,99a	1,25a	70,84c
CC4	7,9b	0,99c	0,47b	0,66c	18,66b	93,06b	0,84b	85,33b
CC5	7,8b	0,92c	0,52b	0,63c	18,44b	85,44b	0,89b	86,84b
CC6	6,5c	1,53b	0,50b	0,98b	4,52c	95,28b	1,03b	65,84d
		Ca^{2+} ($cmol_c\ dm^{-3}$)				K^+ ($cmol_c\ dm^{-3}$)		
	UFPI CB1-8	UFPI B7-3	CIAT 899	Sem Inoculação	UFPI CB1-8	UFPI B7-3	CIAT 899	Sem Inoculação
CC1	2,3cA	2,2bA	2,2cA	2,2bA	0,05bA	0,01bA	0,06bA	0,01dA
CC2	32,7aA	32,9aA	24,9aB	33,5aA	0,23aA	0,19aA	0,25aA	0,23aA
CC3	2,9cA	3,1bA	3,0cA	2,8bA	0,09bB	0,16aA	0,10bB	0,16bA
CC4	5,3bA	5,2bA	5,3bA	5,3bA	0,12bA	0,05bB	0,08bA	0,03dB
CC5	6,2bA	5,5bA	6,1bA	4,6bA	0,08bA	0,05bA	0,07bA	0,04dA
CC6	2,3cA	2,4bA	2,1cA	2,3bA	0,06b	0,03bA	0,02bA	0,09cA
		P (mg dm^{-3})				SB ($cmol_c\ dm^{-3}$)		
	UFPI CB1-8	UFPI B7-3	CIAT 899	Sem Inoculação	UFPI CB1-8	UFPI B7-3	CIAT 899	Sem Inoculação
CC1	1,7cA	2,0cA	2,2cA	2,2cA	2,9bA	2,8bA	2,9bA	2,7bA
CC2	15,0bA	12,9bA	16,9bA	19,6bA	37,7aA	37,8aA	29,0aB	38,7aA
CC3	90,76aA	82,8aA	67,1aB	40,2aC	3,4bA	3,8bA	3,6bA	3,4bA
CC4	17,32bA	18,4bA	18,3bA	13,4bA	5,8bA	5,7bA	5,9bA	5,8bA
CC5	20,1bA	15,1bA	17,7bA	10,5bA	5,8b	6,1bA	6,8bA	5,1bA
CC6	3,0cA	3,6cA	2,8cA	2,6cA	2,9bA	3,0bA	2,7bA	3,0bA
		T ($cmol_c\ dm^{-3}$)				MO ($g\ kg^{-1}$)		
	UFPI CB1-8	UFPI B7-3	CIAT 899	Sem Inoculação	UFPI CB1-8	UFPI B7-3	CIAT 899	Sem Inoculação
CC1	5,7bA	5,2bA	5,4bA	4,9bA	0,33aA	0,18aB	0,11bC	0,11aC
CC2	38,4aA	38,6aA	29,7aB	39,4aA	0,04cA	0,03dA	0,01cA	0,01bA
CC3	4,9bA	5,3bA	5,0bA	4,9bA	0,07cA	0,07cA	0,08bA	0,08aA
CC4	6,6bA	6,8bA	5,9bA	7,0bA	0,08cB	0,13bB	0,18aA	0,12aB
CC5	7,8bA	7,0bA	7,6bA	6,1bA	0,11bA	0,08cA	0,09bA	0,10aA
CC6	4,3bA	4,5bA	4,3bA	4,7bA	0,11bA	0,11bA	0,10bA	0,09aA

V: saturação por base, H+Al: acidez potencial, Ca: cálcio, Mg: magnésio, SB: soma de bases, CTC: capacidade de troca catiônica a pH 7, P: fósforo, K: potássio, Cu: cobre, Mn: manganês, Fe: ferro, Zn: zinco e MOS: matéria orgânica do solo. CC1: solo sem adubação, CC2: apenas saprólito, CC3: solo adubado com NPK, CC4: solo adubado com 20 t ha^{-1} de saprólito, CC5: solo adubado com 20 t ha^{-1} de saprólito + solubilizador, CC6: solo + solubilizador. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5%.

No solo franco-arenoso, o tratamento contendo apenas o saprolito (CC2) apresentou os maiores valores de pH (8,7 a 9,0), Ca^{2+} (34,0 a 38,4 cmolc dm^{-3}), Mg^{2+} (4,95 cmolc dm^{-3}), K^{+} (0,31 cmolc dm^{-3}), Mn (18,62 mg dm^{-3}), T (42,55 cmolc dm^{-3}), SB (39,1 a 43,8 cmolc dm^{-3}) e V% (97,3%). Por outro lado, apresentou baixo teor de Fe (13,80 mg dm^{-3}) quando comparado as demais condições, além de baixos teores de Cu e Zn. Esse tratamento também se destacou pela ausência de Al^{3+} e, consequentemente, pela inexistência de m%, indicando efetiva neutralização da acidez.

Em relação ao Ca^{2+} e à SB, a condição de cultivo CC2 proporcionou os maiores valores quando associada à inoculação com a estirpe UFPI CB1-8, evidenciando efeito sinérgico entre o saprolito e essa estirpe. Por outro lado, os maiores teores de P (65,07 mg dm^{-3}) foram registrados nos tratamentos adubados com NPK (CC3) (Tabela2).

No solo argilo-arenoso, a condição de cultivo CC2 também resultou no maior pH (8,8), elevada SB (29,0 a 38,7 cmolc dm^{-3}) e aumento da V% (97,9%) e T (29,7 a 39,4 cmolc dm^{-3}), bem como em altos teores de Ca^{2+} (24,9 a 33,5 cmolc dm^{-3}), Mg^{2+} (4,58 cmolc dm^{-3}) e Mn (23,43 mg dm^{-3}), acompanhados de redução nos teores de Fe, Cu e Zn. Para Ca^{2+} e SB, na condição CC2, a inoculação com CIAT 899 proporcionou menores valores, inclusive quando comparada à ausência de inoculação. A condição CC3 apresentou elevado teor de P (40,2 a 90,76 mg dm^{-3}) em relação às demais condições, evidenciando um efeito expressivo das estirpes UFPI CB1-8 e UFPI B7-3 (Tabela3).

A figura 9 evidencia o efeito da inoculação sobre a CTC (Figura 9A) e a V% (Figura 9B) no solo franco-arenoso, destacando o tratamento com a estirpe UFPI CB1-8, embora não tenha diferenciado significativamente da ausência de inoculação para a CTC. Já no solo argilo-arenoso, a mesma estirpe também esteve associada à redução do teor de Cu.

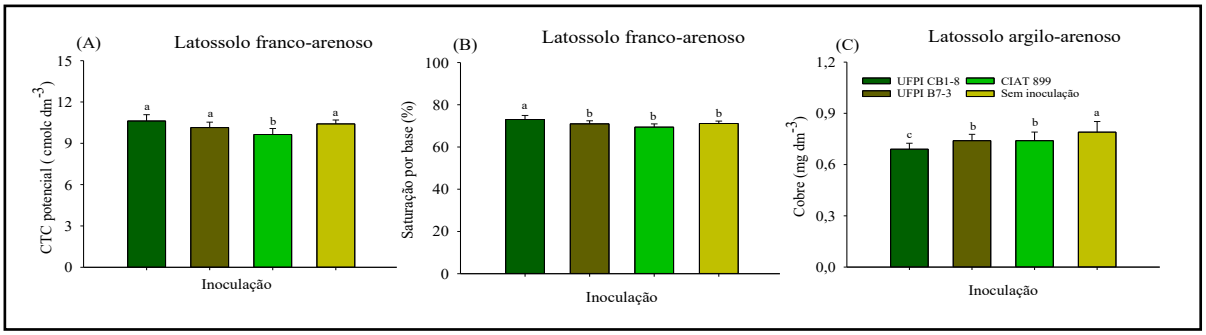


Figura 9 - Efeito da inoculação sobre a CTC potencial (A) e saturação por bases (B) em Latossolo Amarelo franco-arenoso e teor de cobre (C) em Latossolo Amarelo argilo-arenoso em Bom Jesus-PI, Brasil. Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si (Teste de Scott-Knott, $p < 0,05$).

O acúmulo de macronutrientes (N, K e Ca) na raiz e parte aérea do feijão-caupi ocorreu em função da interação entre a condição de cultivo e a inoculação (Figura 10) em ambos os experimentos (Apêndices 3 e 6). No experimento conduzido em solo argilo-arenoso, esse padrão também foi observado para o acúmulo de P e Mg, tanto na parte aérea quanto na raiz (Figuras 10D e 0J). Por outro lado, no experimento realizado em solo franco-arenoso, a interação entre os fatores para o acúmulo de P e Mg ocorreu apenas na parte aérea das plantas (Figuras 10C e 10I).

No solo franco-arenoso, tanto na parte aérea quanto na raiz, o acúmulo de N, K e Ca (Figuras 10A, 10E e 10G) foi máximo nos tratamentos em que o solo recebeu adubação NPK associada à inoculação com as estirpes UFPI CB1-8 e UFPI B7-3. O acúmulo de P e Mg na parte aérea (Figuras 10C e 10I) apresentou padrão semelhante; contudo, para o Mg, a estirpe UFPI B7-3 destacou-se por promover maior acúmulo desse nutriente.

No solo argilo-arenoso, os padrões de resposta foram semelhantes, com considerável acúmulo de macronutrientes nos tratamentos que receberam adubação NPK. Nesse experimento, observou-se também destaque para a estirpe CIAT 899, em comparação à UFPI CB1-8. No entanto, para o acúmulo de N, P, Ca e Mg na parte aérea e na raiz, bem como para o K na raiz, os resultados não diferiram estatisticamente daqueles obtidos sem inoculação.

Nos dois experimentos, observou-se interação entre os fatores estudados para o acúmulo de micronutrientes, tanto na raiz quanto na parte aérea, com exceção do Zn no solo argilo-arenoso, cuja interação foi verificada apenas para o acúmulo desse nutriente na raiz (Figura 11).

No solo franco-arenoso, o acúmulo de Cu, Mn, Fe e Zn na parte aérea foi maior quando as plantas receberam adubação com NPK (CC3), especialmente quando associada à inoculação com a estirpe UFPI B7-3. O acúmulo desses elementos na raiz apresentou comportamento semelhante em relação à adubação, destacando-se para Cu, Fe e Zn.

No solo argilo-arenoso, a condição de adubação CC3 também se destacou, promovendo maior acúmulo de Cu (parte aérea e raiz), Mn (parte aérea) e Fe (raiz). Para o acúmulo de Mn na raiz, em ambos os solos (Figuras 11C e 11D), as condições CC5 e CC6 apresentaram os maiores valores. Na condição CC5, o uso do saprolito associado ao solubilizador, combinado com as bactérias UFPI CB1-8 e UFPI B7-3, resultou em maior acúmulo de Mn na raiz do feijão-caupi, embora não tenha diferido estatisticamente da condição sem inoculação.

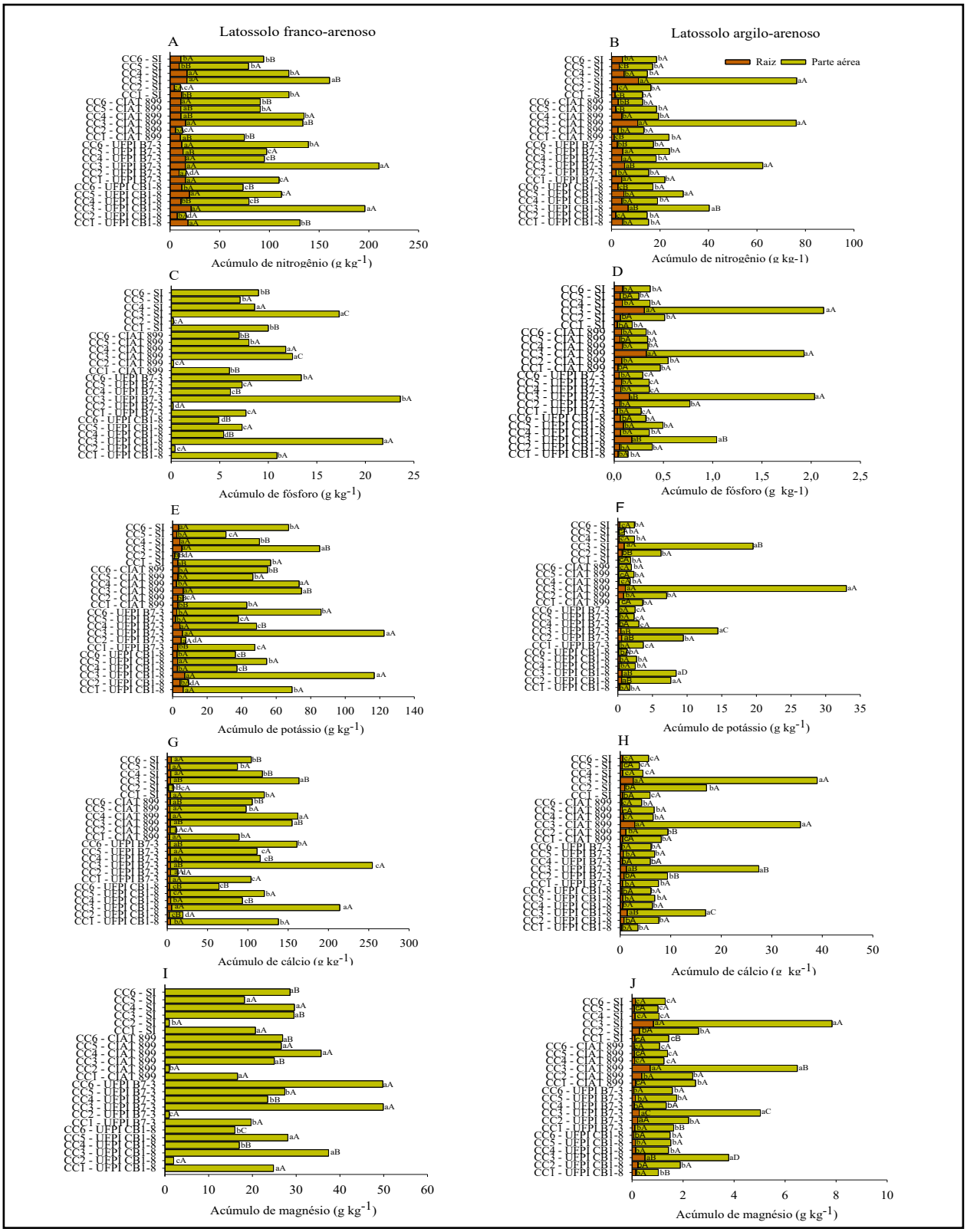


Figura 10 - Efeito da interação no acúmulo de macronutrientes na parte aérea e raiz (A, B, D, E, F, G, H, J) e parte aérea (C, I) de feijão-caupi cultivado em Latossolo Amarelo franco-arenoso (A, C, E, G, I) e Latossolo Amarelo argilo-arenoso em Bom Jesus-PI, Brasil. Médias com letras maiúsculas iguais não diferem entre inoculações e letras minúsculas, entre as condições de cultivo (teste de Scott-Knott, $p < 0,05$).

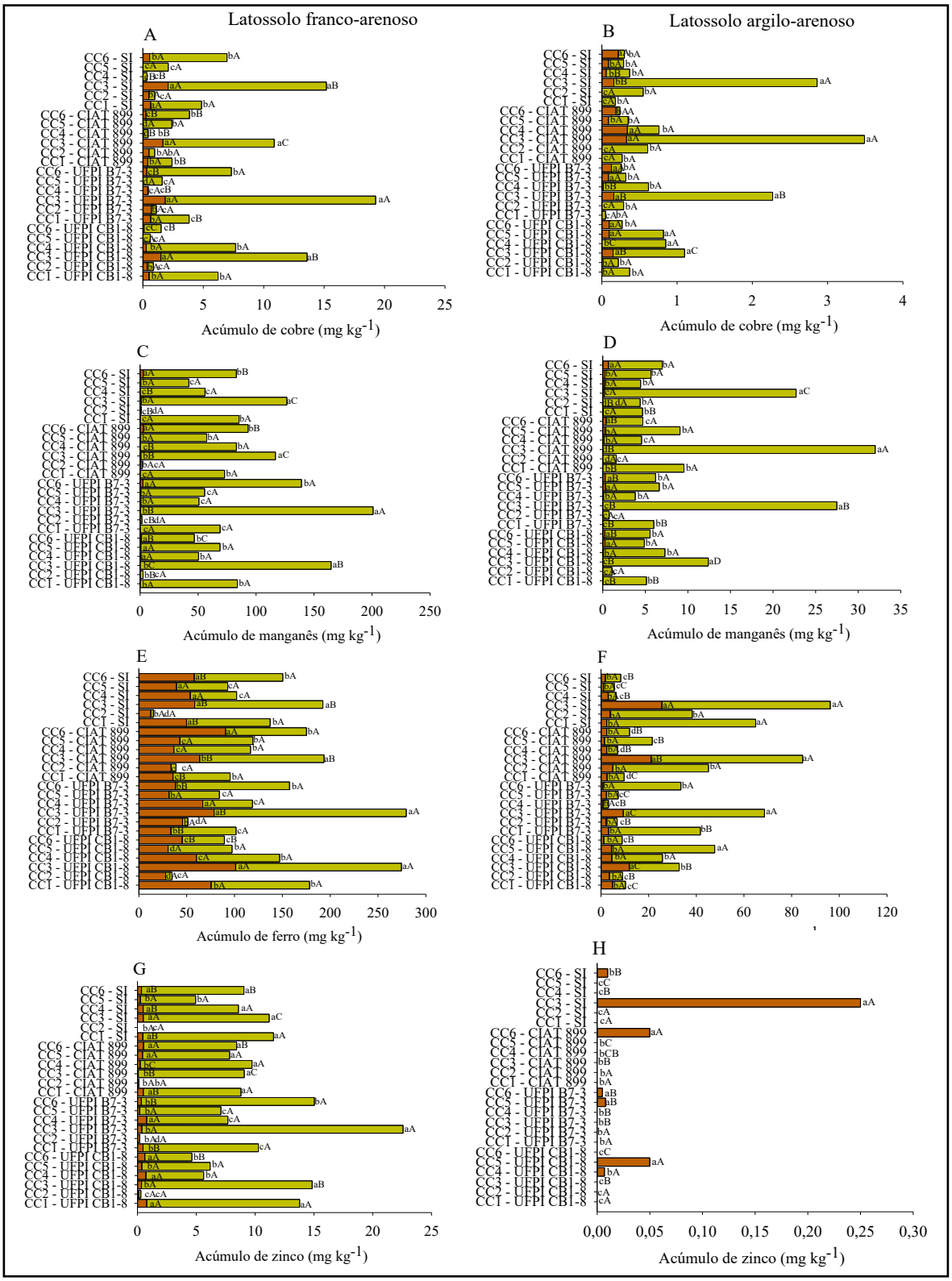


Figura 11 - Efeito da interação sobre acúmulo de micronutrientes na parte aérea e na raiz (A, B, C, D, E, F, G) e na raiz (H) de feijão-caupi cultivado em Latossolo Amarelo franco-arenoso (A, C, E, G) e Latossolo Amarelo argilo-arenoso (B, D, F, H) em Bom Jesus-PI, Brasil. Médias com letras maiúsculas iguais não diferem entre inoculações e letras minúsculas, entre as condições de cultivo (teste de Scott-Knott, $p < 0,05$).

A Figura 12 reforça os resultados apresentados nas Figuras 10 e 11, evidenciando que no solo franco-arenoso, o acúmulo de P na raiz (Figura 12A) e de Mg (Figura 12B) foi significativamente maior no tratamento CC3. De forma semelhante, observou-se maior acúmulo de Zn na parte aérea das plantas de feijão-caupi cultivadas no solo argilo-arenoso (Figura 12C).

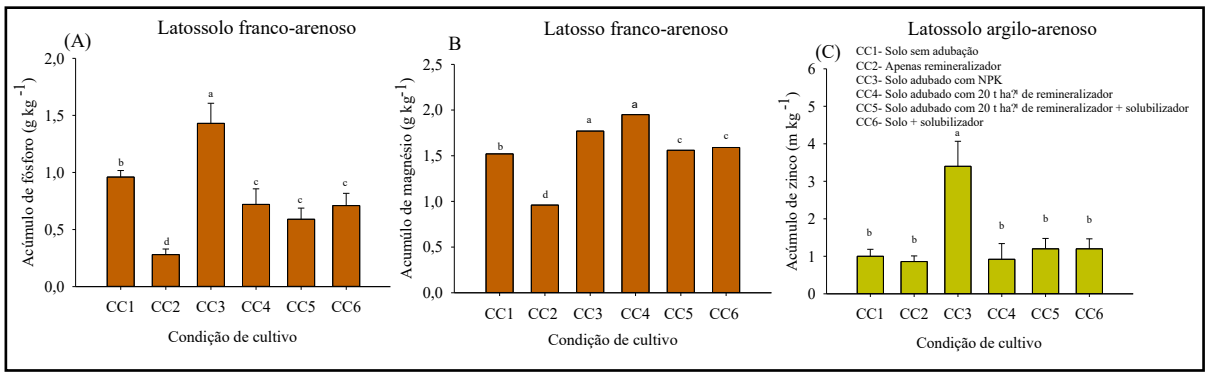


Figura 12 - Efeito da condição de cultivo no acúmulo de fósforo (A) e magnésio (B) na raiz e zinco na parte aérea (C) de *Vigna unguiculata* cultivado em Latossolo Amarelo franco-arenoso (A, B) e Latossolo Amarelo argilo-arenoso (C) em Bom Jesus-PI, Brasil. Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si (Teste de Scott-Knott, $p < 0,05$).

6 DISCUSSÃO

A resposta do sistema radicular e da nodulação do feijão-caupi foi modulada pelas condições de cultivo da adubação e pelas inoculações, com efeitos distintos entre os solos avaliados. De forma geral, a adubação com NPK promoveu incrementos no CR, VR e MSN nos tratamentos inoculados com UFPI CB1-8 e UFPI B7-3. Como solo do presente estudo não foi esterilizado, trabalhos anteriores já relatavam a ocorrência de comunidades de bactérias nodulíferas indígenas capazes de nodular e induzir a produção de grãos do feijão-caupi similar ao tratamento inoculado com estirpe autorizada de *Bradyrhizobium* para a cultura no Brasil. Isso explica a nodulação ocorrida nos tratamentos inoculados com as estirpes dos gêneros *Bacillus* e *Paenibacillus*, que embora não nodulem, são relatadas na literatura como indutoras de nodulação (Silva *et al.*, 2007), podendo neste estudo ter induzido a nodulação.

O efeito positivo do NPK, conforme já esperado, está associado ao suprimento equilibrado de N, P e K, que estimula a emissão e o crescimento de raízes capazes de explorar maior volume de solo. Enquanto o P favorece a formação de grupos radiculares, o N atua no desenvolvimento de raízes laterais (Ruíz-Herrera; Shane; López-Bucio, 2015), efeito particularmente relevante em solos de baixa fertilidade (Sparks; Benfey, 2017), como o argilo-arenoso utilizado neste estudo, onde o aporte direto desses nutrientes foi essencial para o desenvolvimento radicular.

Em trabalho conduzido na mesma região com a cultura do feijão-caupi inoculado, cujo objetivo foi avaliar o efeito da adubação nitrogenada e da aplicação de micronutrientes sobre a nodulação e a produtividade da cultivar inoculada com a cepa INPA 03-11B (*Bradyrhizobium*), observou-se que as massas frescas e seca dos nódulos diminuíram linearmente com o aumento das doses de N. A massa fresca de nódulos (MFN) foi descrita pela equação y=-0,002046x+0,482250, enquanto a massa seca de nódulos (MSN) seguiu a equação y=-0,000325x+0,090250. Ambas indicam que a dose de 20 kg de N provoca apenas uma redução pouco pronunciada, mantendo valores próximos aos da testemunha. Contudo, a partir de doses superiores a 35 kg de N, a queda na MFN e na MSN torna-se mais acentuada, evidenciando o efeito inibitório progressivo do N mineral sobre a nodulação (Martins *et al.,* 2013).

Já em solos de maior fertilidade natural, como o franco-arenoso, com pH próximo a 6,0, saturação por bases de 59% e ausência de Al (Tabela 1), o crescimento foi favorecido, independentemente da inoculação, corroborando Kalamulla e Yapa (2023), que relatam menor resposta à inoculação em condições adequadas de disponibilidade de nutrientes.

No solo argilo-arenoso, a ausência de efeito da inoculação sobre variáveis radiculares pode estar relacionada à presença de populações nativas adaptadas às condições locais, capazes de competir com as estirpes introduzidas (Nyaga; Njeru, 2020), somada ao suprimento de nutrientes via adubação, reduzindo a dependência da simbiose para obtenção de N. Ainda assim, no solo franco-arenoso, a estirpe UFPI CB1-8 destacou-se para CR, possivelmente devido à produção de fitormônios, como auxinas, e à capacidade de solubilização de fonte de P insolúvel, como o P-Ca (Costa *et al*., 2013), favorecendo a arquitetura radicular e a absorção de água e nutrientes.

No solo argilo-arenoso, a condição de cultivo com saprolito sem inoculação também apresentou valores expressivos de NN e MSN, sugerindo atividade de bactérias nativas. Esse efeito pode estar associado à composição química do saprolito, rico em Ca, Mg, K e P (Tabela 1), que cria um ambiente favorável à proliferação e atuação de microrganismos na rizosfera, potencializando a disponibilidade de nutrientes (Ribeiro *et al*., 2020) e o processo de nodulação (Nabi, 2023).

Do ponto de vista prático, considerando as condições edafoclimáticas e de manejo do estudo, a inoculação pode não apresentar vantagens econômicas em todos os cenários, reforçando a necessidade de validação em campo das estirpes, levando em conta a competição com populações nativas, a adaptabilidade ao ambiente e as demandas fisiológicas da cultura (Mendoza-Suárez *et al*., 2021; Athul *et al*., 2022).

A adubação com NPK promoveu aumentos na AP, DC e NT em ambos os solos, corroborando com estudo que destaca a alta eficiência de fertilizantes minerais solúveis na promoção do crescimento vegetal pela rápida disponibilização e assimilação de nutrientes, resultando em melhorias morfofisiológicas em leguminosas, como também observado no feijão-francês (*Phaseolus vulgaris* L.) (Maurya *et al*., 2024). No solo franco-arenoso, entretanto, o tratamento constituído pelo solo sem adubação (CC1) apresentou desempenho semelhante ao solo com NPK para AP, DC e NT, indicando que a fertilidade inicial do solo foi suficiente para sustentar o crescimento, resultado consistente com Wang *et al*. (2019), que observaram baixa resposta à adubação em solos já providos de nutrientes. Ainda nesse solo, a aplicação de saprolito na dose de 20 t ha^{-1} e/ou solubilizador beneficiou essas variáveis, sugerindo contribuição positiva ao desenvolvimento vegetal.

Por outro lado, o cultivo de feijão-caupi em solo com aplicação exclusiva de saprolito resultou em plantas menos desenvolvidas, apesar da composição química favorável, devido à baixa solubilidade e à liberação gradual de nutrientes (Benevides Filho *et al*., 2023). Assim, o saprolito pode ser considerado não como substituição total, mas, como complemento à

adubação mineral em cultivos com alta demanda inicial (Ribeiro *et al*., 2020). No solo franco-arenoso, a associação de saprolito (20 t ha^{-1}) com inoculação, especialmente com a estirpe CIAT 899, aumentou a produção de MSPA e MST em 93,03% e 84,97%, respectivamente, em relação ao solo com isolado, evidenciando que a inoculação potencializa o efeito de fontes de liberação lenta.

A interação entre a condição de cultivo da adubação e da inoculação variou com a textura do solo. No solo franco-arenoso, a adubação mineral associada à UFPI B7-3 resultou nos maiores valores de MSPA e MST. Já no argilo-arenoso, a CIAT 899 apresentou bom desempenho quando associada a condição de adubação com NPK, embora seu efeito isolado não tenha sido determinante, provavelmente devido ao adequado suprimento de nutrientes pela adubação mineral. Estudos de Souza *et al*. (2024) indicam que a inoculação com *Rhizobium tropici* (espécie da CIAT 899) pode reduzir significativamente as doses de NPK no feijão-comum, sugerindo potencial semelhante para o feijão-caupi, especialmente em solos argilo-arenosos, que apresentam boa retenção de água e nutrientes e ambiente favorável à fixação biológica de N.

Os índices relativos de clorofila, indicadores indiretos do status nutricional, aumentaram significativamente com a aplicação de NPK em ambos os solos, reforçando a importância do fornecimento adequado de nutrientes para o desempenho fisiológico (Taiz *et al*., 2017; Siqueira *et al*., 2023). No solo franco-arenoso, as menores médias ocorreram no tratamento com saprolito, sobretudo sem inoculação, devido à lenta liberação de nutrientes (Ribeiro *et al*., 2020). O curto período do ciclo até o florescimento pode não ter sido suficiente para efeitos mais expressivos, hipótese também levantada por Gotz, Piovesan e Castamann (2020), que observaram baixa resposta do saprolito no feijão-preto em três meses.

No solo argilo-arenoso, não houve diferença estatística entre o tratamento com NPK e tratamento com solubilizador para clorofila *a* e total, sugerindo maior solubilização de minerais, devido à maior superfície de contato e menor lixiviação. Microrganismos solubilizadores aumentam a disponibilidade de N, P e K na rizosfera e reduzem perdas, beneficiando a manutenção da atividade fotossintética (Kumawat *et al*., 2017), resultado coerente com Lacerda *et al*. (2020), que observaram forte correlação entre fornecimento de N e aumento de clorofila no feijão-caupi.

A eficácia (em relação à testemunha absoluta) e eficiência (em relação à condição de cultivo adubada com NPK) na produção de biomassa com uso ou não dos inoculantes testados variaram em função da interação entre as condições de cultivo adubação–inoculação. No solo franco-arenoso, a adubação com NPK (referência) não foi superada pelas demais condições de

cultivo, e as estirpes UFPI CB1-8 e CIAT 899 também apresentaram ganhos, mesmo sem fertilizante. No solo argilo-arenoso, a inoculação foi mais expressiva sem adubação mineral, destacando-se UFPI B7-3 e CIAT 899, que aumentaram a eficiência em solos com elevada acidez e baixa saturação por bases (Jing *et al*., 2024). A CIAT 899 destaca-se pela alta eficiência na FBN e solubilização de P, e tanto ela quanto a UFPI CB1-8 produzem auxinas que estimulam o desenvolvimento radicular (Marra *et al*., 2011; Costa *et al*., 2013; Longatti; Marra; Moreira, 2013).

A PCA conjunta para ambos os solos revelou padrões consistentes de resposta em às combinações de adubação e inoculação. A PCA 1 associou-se fortemente a variáveis de crescimento e biomassa (MSPA, MST, AF, AP, NT, DC, CLO) e eficiência (EFI), refletindo a influência marcante da adubação com NPK. Esse efeito positivo está relacionado à função essencial do N, P e K na fotossíntese, respiração, síntese de proteínas e regulação osmótica (Taiz *et al*., 2017), promovendo maior acúmulo de massa seca e desempenho fisiológico das plantas, como também reportado por Anjos *et al*. (2017) que observaram aumentos significativos de massa seca da haste e da área foliar em feijoeiro comum quando houve adubação com NPK, indicando uma melhoria na atividade fotossintética e na produção de biomassa. Além disso, maiores valores nos índices de eficiência e eficácia sugerem que, além do crescimento vegetativo, as plantas sob adubação com NPK apresentaram maior capacidade de converter os recursos disponíveis (luz, água e nutrientes) em biomassa.

A PCA 2 agrupou atributos radiculares e de nodulação (NN, MSN, CR, VR), indicando independência relativa dessas características. A correlação entre NPK com UFPI B7-3 e UFPI CB1-8 combinou alto crescimento e elevada nodulação, enquanto o saprolito isolado correlacionou-se mais com NN e MSN, reforçando seu potencial para estimular a nodulação pela liberação gradual de nutrientes e estímulo microbiano (Ditta *et al*., 2018; Rodrigues *et al*., 2024).

Assim, a PCA evidencia que, independentemente da condição textural do solo avaliado no estudo, a adubação com NPK e a inoculação com estirpes eficientes maximizam o crescimento e a biomassa do feijão-caupi, enquanto o uso do saprolito e da inoculação isolada impactam mais a nodulação e atributos radiculares, reforçando a importância de estratégias combinadas para otimizar crescimento e desempenho simbiótico.

O saprolito proveniente do Núcleo de Desertificação de Gilbués indica teores favoráveis de nutrientes essenciais como Ca, Mg e K e boa CTC (Tabela1), evidenciando o seu uso potencial como fonte gradativa de nutrientes para o desenvolvimento vegetal. Ensaios de cultivo com feijão-caupi conduzidos nesse material confirmaram esse comportamento, uma vez

que, após o ciclo da cultura, as novas análises de fertilidade também revelaram manutenção de bons níveis de nutrientes, mantendo ainda um alto pH, SB, V% e CTC, além de redução do H + Al e do Al^{+3}, reforçando a qualidade química intrínseca desse material.

Esses resultados são atribuídos à composição mineralógica do material saprolito (rico em óxidos de cálcio, magnésio e potássio, que contribuem para a neutralização do alumínio trocável e para o enriquecimento da solução do solo. A presença significativa desses nutrientes no saprolito, favorece o aumento da concentração de cátions trocáveis e, consequentemente, a melhoria das propriedades químicas associadas à fertilidade. Em ambientes tropicais, esse efeito tende a ser potencializado pelas condições climáticas, que aceleram a solubilização dos minerais e promovem a liberação gradual dos nutrientes, garantindo benefícios de curta, média e longa duração (Melo *et al*., 2012).

Observações semelhantes foram relatadas por Rodrigues *et al*. (2024), que também verificaram a atuação positiva de materiais com potencial remineralizador na melhoria das condições químicas do solo. Esses autores destacam o potencial condicionante desses materiais e sua contribuição para a redução da acidez e para o equilíbrio nutricional, reforçando que seu uso representa uma alternativa sustentável para a manutenção da fertilidade e da produtividade dos sistemas agrícolas.

Os resultados obtidos evidenciaram o alto potencial agronômico da interação entre o saprolito e a bactéria UFPI CB1-8, indicando que essa combinação pode constituir uma estratégia eficiente de manejo sustentável, capaz de otimizar a fertilidade do solo e reduzir a dependência de insumos químicos solúveis. O desempenho superior dos tratamentos contendo ambos os componentes, sugere uma sinergia funcional entre a qualidade mineralógica do saprolito e a capacidade metabólica da estirpe bacteriana em promover a liberação e mobilização de nutrientes para a solução do solo.

A eficiência da UFPI CB1-8 está possivelmente associada à sua habilidade em produzir ácidos orgânicos e enzimas extracelulares, mecanismos amplamente reconhecidos por favorecerem a solubilização de minerais e a liberação de íons essenciais, como Ca^{2+}, Mg^{2+} e K^{+} (Setiawati *et al*., 2022). Resultados semelhantes foram relatados por Assunção *et al*. (2024), que observaram aumento nos teores de Ca^{2+} em solos tratados com remineralizadores associados a estirpes do gênero *Bacillus*, evidenciando o papel desses microrganismos na ativação biogeoquímica desses materiais.

Nos dois experimentos, o aumento do acúmulo de N, K e P nas plantas inoculadas com *Rhizobium tropici* (CIAT 899) e *Bacillus* sp. (UFPI CB1-8) mediante adubação com NPK (CC3) indica uma contribuição simultânea da fixação biológica do N, promovida pela CIAT

899 e do maior crescimento radicular, proporcionado por ambas as estipes, uma vez que tanto a CIAT 899 quanto a UFPI CB1-8 produzem auxinas que estimulam o crescimento das raízes, favorecendo o desenvolvimento das plantas (Marra *et al*., 2011; Costa *et al*., 2013; Longatti; Marra; Moreira, 2013). Logo, plantas bem desenvolvidas são indicativas de maior produção de fitomassa, fator que exerce influência direta sobre o acúmulo total de nutrientes. Segundo Mateus *et al*. (2011), o aumento da matéria seca está associado ao maior acúmulo de nutrientes, mesmo quando os teores desses elementos nos tecidos vegetais são reduzidos. Isso ocorre porque a quantidade total de nutrientes acumulados é mais fortemente determinada pela produção de biomassa do que pelos teores individuais de nutrientes, refletindo o efeito do crescimento vigoroso das plantas.

O efeito benéfico da adubação com NPK está associado ao fornecimento balanceado desses elementos essenciais, que favorecem a emissão e o alongamento das raízes, resultando em um sistema radicular mais denso e eficiente na absorção de nutrientes (Ruíz-Herrera; Shane; López-Bucio, 2015).

De modo geral, a condição de cultivo CC3 também promoveu os maiores acúmulos de Ca e Mg, tanto na parte aérea quanto nas raízes, independentemente da textura do solo, indicando sua eficácia na promoção de condições ideais de crescimento. O N, P e K quando fornecidos em doses equilibradas, favorecem o desenvolvimento radicular, a absorção iônica e o transporte de nutrientes na planta. Além, disso, a rápida disponibilização e assimilação de nutrientes minerais, resulta em melhorias morfofisiológicas em leguminosas, como também observado no *Phaseolus vulgaris* (Maurya *et al*., 2024).

O N, ao estimular o crescimento vegetativo e a síntese de proteínas, aumenta a demanda metabólica por Mg, elemento essencial na formação da clorofila e na ativação de enzimas envolvidas no metabolismo do N. Dessa forma, o fornecimento adequado de N tende a intensificar a absorção e o acúmulo de Mg (Castro *et al*., 2023). O P, por sua vez, contribui indiretamente para a absorção de Mg e Ca ao promover o crescimento e a ramificação do sistema radicular, ampliando o volume de solo explorado e a eficiência de absorção de cátions (Jose, 2023). Já o K apresenta uma relação mais complexa com o Mg, pois ambos competem pelos mesmos sítios de absorção nas raízes. No entanto, quando o K é aplicado em quantidades adequadas, sem causar desequilíbrio na relação K/Mg, pode favorecer o funcionamento fisiológico e a redistribuição de cátions dentro da planta, contribuindo para o acúmulo equilibrado de nutrientes (Xie *et al*., 2021; Dölger; Henningsen; Mühling, 2024). Assim, os autores destacam que o efeito antagônico do K sobre o Mg durante a absorção radicular requer um manejo cuidadoso para evitar a deficiência de Mg induzida por K nas plantas.

Diante do exposto, o aumento observado no acúmulo de Ca e Mg nas plantas de feijão-caupi adubadas com NPK sugere que as doses utilizadas promoveram um balanço nutricional adequado, resultando em maior eficiência no transporte e na assimilação desses nutrientes. E essa eficiência dos fertilizantes solúveis na promoção do crescimento vegetal se dá pela rápida disponibilização e assimilação de nutrientes, resultando em melhorias morfofisiológicas em leguminosas, como também observado no *Phaseolus vulgaris* (Maurya *et al*., 2024).

As inoculações com as estirpes UFPI CB1-8 e CIAT 899 mantiveram-se como as mais eficientes em termos de simbiose, sobretudo no experimento conduzido em solo franco-arenoso. Nesse ambiente, o tratamento inoculado com UFPI CB1-8 apresentou o maior acúmulo de Ca tanto na raiz quanto na parte aérea. Entretanto, é importante destacar que a estirpe UFPI B7-3 apresentou, numericamente, o maior acúmulo de Ca na parte aérea, comportamento que também se repetiu para o acúmulo de Mg nas plantas cultivadas nesse tipo de solo. Por outro lado, no solo argilo-arenoso, embora as bactérias tenham proporcionado aumentos pontuais no acúmulo de nutrientes, esses incrementos não foram estatisticamente diferentes dos observados no tratamento sem inoculação. Esse resultado confirma o potencial das bactérias em promover não apenas a FBN, mas também melhor absorção de nutrientes minerais**,** principalmente som solos com boa fertilidade. As três bactérias utilizadas no estudo facilitam a solubilização e mobilização de nutrientes como P (Marra *et al*., 2011; Costa *et al*., 2013; Longatti; Marra; Moreira, 2013; Costa *et al*., 2016)

Os resultados demonstram que a adubação mineral NPK (CC3) foi o principal fator responsável pelo aumento no acúmulo de Cu, Mn, Fe e Zn na parte aérea e nas raízes do feijão-caupi, independentemente do tipo de solo. Esse efeito decorre do papel central dos macronutrientes no crescimento vegetal: N, P e K participam de processos fisiológicos essenciais, como fotossíntese, desenvolvimento radicular, síntese de proteínas e regulação energética, os quais ampliam a capacidade de absorção de nutrientes pela planta. Assim, o incremento da biomassa resultante da adubação intensifica a extração e o acúmulo de micronutrientes, conforme também apontado por estudos que demonstram a influência positiva do adequado suprimento de macronutrientes na absorção de elementos como Fe, Zn e Mn (Ai *et al*., 2017).

Os resultados mostraram também que, embora as estirpes avaliadas possuam mecanismos reconhecidos de promoção do crescimento vegetal como solubilização de P, produção de AIA e, no caso da CIAT 899, a fixação biológica do N, esses processos, isoladamente, não foram suficientes para aumentar o acúmulo de micronutrientes pelas plantas de feijão-caupi. Os maiores incrementos ocorreram apenas quando a inoculação foi combinada

ao aporte mineral adequado (CC3), indicando que a eficácia dessas bactérias depende diretamente das condições nutricionais do solo. De fato, a literatura destaca que microrganismos fixadores de N e solubilizadores de fosfato expressam seu potencial máximo apenas em solos com disponibilidade de nutrientes, que permitem maior atividade metabólica (Patel; Panchal, 2020).

Em corroboração ao discorrido na literatura, no presente estudo, na ausência de adubação (CC1), a contribuição dessas estirpes para a disponibilização de micronutrientes foi limitada, possivelmente devido à baixa oferta de substratos a serem solubilizados, confirmando a discussão levantada anteriormente. Nesse sentido, quando essa base nutricional está ausente, os processos de solubilização e mobilização microbiana tendem a ser lentos ou insuficientes em ciclo curto das culturas.

Esse padrão também ajuda a explicar por que as condições em que se utilizou o saprolito (CC2, CC4 e CC5), não foi eficiente, mesmo quando associado a microrganismos. Embora o material utilizado possua uma quantidade considerável de nutrientes em sua composição (Tabela 1), esses materiais possuem liberação gradual de nutrientes, que depende de processos de intemperismo físico-químico frequentemente muito lentos (Benevides Filho *et al*., 2023). Portanto, a combinação de saprolito + inoculação mostrou-se insuficiente dentro do ciclo da cultura avaliado, porque o saprolito possui liberação lenta, bem como a atuação microbiana que ocorre de forma gradual, portanto ambas as alternativas de disponibilização de nutrientes exigem tempo maior que o ciclo experimental estudado para gerar efeitos significativos.

7 CONCLUSÃO

A adubação mineral com NPK foi o principal fator responsável pelo desempenho do feijão-caupi, promovendo maiores incrementos em crescimento, produção de biomassa, teores de clorofila e acúmulo de nutrientes, independentemente do tipo de solo. Esses resultados evidenciam que, em culturas de ciclo curto, o desenvolvimento vegetal é fortemente condicionado pela disponibilidade imediata de nutrientes no solo.

O saprolito, apesar de apresentar características químicas favoráveis a melhoria das condições de fertilidade do solo, não promoveu incremento no acúmulo de nutrientes pelas plantas, em função da lenta liberação de seus elementos. Ainda assim, evidenciou potencial como fonte complementar de nutrientes de liberação gradual, sobretudo quando associado às estirpes *Paenibacillus sp.* (UFPI B7-3) e *Rhizobium tropici* (CIAT 899).

A eficiência da inoculação foi condicionada pelas características químicas do solo, evidenciando que a expressão do potencial promotor de crescimento das estirpes depende da disponibilidade de nutrientes. No solo franco-arenoso, a associação entre saprolito e *Paenibacillus sp*. (UFPI B7-3) e *Rhizobium tropici* (CIAT 899) resultou em maior produção de biomassa, enquanto no solo argilo-arenoso essas estirpes foram eficientes mesmo na ausência de adubação mineral, destacando sua capacidade de fixação biológica de nitrogênio e solubilização de fósforo.

A integração entre saprolito e as estirpes *Paenibacillus* sp. (UFPI B7-3) e *Rhizobium tropici* (CIAT 899) configura-se como estratégia promissora para sistemas mais sustentáveis, ao aumentar a eficiência no uso de insumos e reduzir a dependência de fertilizantes minerais. Contudo, esses insumos não substituem a adubação solúvel no curto prazo, atuando de forma complementar, com eficácia do uso condicionada à dinâmica de liberação de nutrientes e à sua sincronização com a demanda das plantas.

REFERÊNCIAS

ABD-ELGAWAD, M. M.; ASKARY, T. H. Factors affecting success of biological agents used in controlling the plant-parasitic nematodes. **Egyptian Journal of Biological Pest Control**, v. 30, n. 1, p. 17, 2020.

AGUIAR, R. B.; GOMES, J. R. C. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea, estado do Piauí**: diagnóstico do município de Gilbués. Fortaleza: CPRM, 2004. 20 p.

AI, Z.; WANG, G.; WANG, G.; LIANG, C.; LIANG, C.; LIU, H.; ZHANG, J.; ZHANG, J.; XUE, S.; XUE, S.; LIU, G.; LIU, G. The effects of nitrogen addition on the uptake and allocation of macro- and micronutrients in *Bothriochloa ischaemum* on Loess Plateau in China. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 1476, 2017.

AL-SHAMMARY, A. A. G.; AL-SHIHMANI, L. S. S.; FERNÁNDEZ-GÁLVEZ, J.;CABALLERO-CALVO, A. A comprehensive review of impacts of soil management practices and climate adaptation strategies on soil thermal conductivity in agricultural soils. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, p. 1-31, 2025.

ANJOS; D. N.; MENDES; H. T. A.; VASCONCELOS; R. C. MOREIRA; P. M.; CANGUSSU; A. C. V.; SOUZA; P. E. Índice de área foliar, SPAD e massa de matéria seca do feijoeiro comum em função dos bioestimulantes, NPK e micronutrientes em Vitória da Conquista–BA. **Agrarian**, v. 10, n. 35, p. 1–9, 2017.

ARAÚJO, M. L. S.; RUFINO, I. A. A.; SILVA, F. B.; BRITO, H. C.; SANTOS, J. R. N. The relationship between climate, agriculture and land cover in MATOPIBA, Brazil (1985–2020). **Sustainability**, v. 16, n. 7, p. 2670, 2024.

ASSUNÇÃO, R. D. V.; CASSOL, P. C.; GRANADOS, S. B.; MAFRA, Á. L.; BITTENCOURT, R. F. Microbial-inoculated remineralizers as source of potassium and other nutrients. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental***,* v. 28, n. 2, 2024.

ATHUL; P. P.; PATRA; R. K.; SETHI; D.; PANDA; N.; MUKHI; S. K.; PADHAN; K.; PATTANAYAK; S. K. Efficient native strains of rhizobia improved nodulation and productivity of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under rainfed condition. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1048696, 2022.

BASSO, M. F.; NEVES, M. F.; GROSSI-DE-SA, M. F. Agriculture evolution, sustainability and trends, focusing on Brazilian agribusiness: a review. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 7, p. 1296337, 2024.

BENEVIDES FILHO; P. R. R; BLASKOWSKI; A. E; RAMOS; M. N; LESSA; L. G. F; FILHO; A. N. Z; ABREU-JUNIOR; C. H; NOGUEIRA; T. A. R. Potential soil remineralizers from silicate rock powders (SRP) as alternative sources of nutrients for agricultural production (Amazon Region). **Minerals**, 13, n. 10, 1255, 2023.

BERGERSEN, F. J.; BROCKWELL, J.; GIBSON, A. H.; SCHWINGHAMER, E. A. Studies of natural populations and mutants of *Rhizobium* in the improvement of legume inoculants. **Plant and Soil**, v. 35, n.1, p. 3-16, 1971.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Atlas das áreas susceptíveis à desertificação do Brasil**. Organização de Moacir Oliveira Santana. Brasília, DF: MMA, 2007. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/. Acesso em: 16 abr. 2026.

BRASIL. Serviço Geológico do Brasil - CPRM. **Mapa geológico do estado do Piauí**. Escala 1:1.000.000. Teresina: CPRM, 2006. 1 mapa. Disponível em: https://www.sgb.gov.br/. Acesso em: 15 abr. 2026.

CAMPOS, J. E. G.; DARDENNE, M. A. Estratigrafia e sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 27, n. 3, p. 269-282, 1997.

CARDOSO, M. J.; MELO, F. D. B.; RIBEIRO, V. Q. Population density on cowpea cultivars with different growth habits in the MATOPIBA region. **Revista Caatinga**, v. 31, n. 01, p. 235-239, 2018.

CASAROLI, D.; VAN LIER, Q. J. Critérios para determinação da capacidade de vaso. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 32, p. 59-66, 2008.

CASTRO, F. A. B.; LUCIO, J. A. L.; SANDOVAL, M. F. Q.; CABEZAS, M. Á. G. Nutrição à base de nitrogênio, enxofre e magnésio no rendimento do milho (*Zea mays* L.). **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research,** v. 6, n. 4, p. 3533-3550, 2023.

CHAUHAN, P.; SHARMA, N.; TAPWAL, A.; KUMAR, A.; VERMA, G. S.; MEENA, M.; SWAPNIL, P. Soil microbiome: diversity, benefits and interactions with plants. **Sustainability**, v. 15, n. 19, p. 14643, 2023.

CHEN, Q.; SONG, Y.; AN, Y.; LU, Y.; ZHONG, G. Mechanisms and Impact of rhizosphere microbial metabolites on crop health, traits, functional components: a comprehensive review. **Molecules**, v. 29, n. 24, p. 5922, 2024.

COSTA, E. M. D.; CARVALHO, F. D.; NÓBREGA, R. S. A.; SILVA, J. S.; MOREIRA, F. M. D. S. Bacterial strains from floodplain soils perform different plant-growth promoting processes and enhance cowpea growth. **Scientia Agricola**, v. 73, n. 4, p. 301-310, 2016.

COSTA, E. M. D.; NÓBREGA, R. S. A.; CARVALHO, F. D.; TROCHMANN, A.; FERREIRA, L. D. V. M.; MOREIRA, F. M. D. S. Promoção do crescimento vegetal e diversidade genética de bactérias isoladas de nódulos de feijão-caupi. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, p. 1275-1284, 2013

CREPANI, E. **Núcleo de Desertificação de Gilbués observado pelo sensoriamento remoto e pelo geoprocessamento**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. Anais**.** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 5185-5192.

DÍAZ-RODRÍGUEZ, G.; CHÁVEZ-LUZANÍA, R. A.; MONTOYA-MARTÍNEZ, A. C.; SANTOS-VILLALOBOS, S. Plant growth-promoting bacteria as a sustainable agricultural strategy. *In:* SANTOS-VILLALOBOS, S. (ed.). **New insights, trends, and challenges in the development and applications of microbial inoculants in agriculture**. [s. l.]: Academic Press, 2024. p. 37-50.

DITTA, A.; IMTIAZ, M.; MEHMOOD, S.; RIZWAN, M. S.; MUBEEN, F.; AZIZ, O.; TU, S. Rock phosphate-enriched organic fertilizer with phosphate-solubilizing microorganisms

improves nodulation, growth, and yield of legumes. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 49, n. 21, p. 2715-2725, 2018.

DOGLIOTTI, S.; GARCÍA, M. C.; PELUFFO, S.; DIESTE, J. P.; PEDEMONTE, A. J.; BACIGALUPE, G. F.; ROSSING, W. A. H. Co-innovation of family farm systems: A systems approach to sustainable agriculture. **Agricultural Systems**, v. 126, p. 76-86, 2014.

DÖLGER, J. L.; HENNINGSEN, J. N.; MÜHLING, K. H. Antagonistic K/Mg ratios: is foliar application of $MgSO_4$ a superior alternative to root resupply? **Plant and Soil**, v. 505, n. 1, p. 747-761 2024.

FERRAZ-ALMEIDA, R.; MOTA, R. P. Routes of soil uses and conversions with the main crops in brazilian Cerrado: A scenario from 2000 to 2020. **Land**, v. 10, n. 11, p. 1135, 2021.

FRANÇA, L. C. J.; PIUZANA, D.; ROSS, J. L. S. Fragilidade Ambiental Potencial e Emergente em núcleo de desertificação no semiárido brasileiro (Gilbués, Piauí). **Revista Espacios**, v. 38, n.31, 21-37, 2017.

FRED, E. B.; WAKSMAN, S. A. Laboratory manual of general microbiology with special reference to the microorganisms of the soil. **Soil Science**, v. 27, n. 3, p. 247, 1929.

GAMALERO, E.; LINGUA, G.; GLICK, B. R. Ethylene, ACC, and the plant growth-promoting enzyme ACC deaminase. **Biology**, v. 12, n. 8, p. 1043, 2023.

GARCIGLIA-MERCADO, C.; CONTRERAS, C. A.; CHOIX, F. J.; DE-BASHAN, L. E.; GÓMEZ-ANDURO, G. A.; PALACIOS, O. A. Metabolic and physiological adaptations of microalgal growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense* growing under biogas atmosphere: a microarray-based transcriptome analysis. **Archives of Microbiology**, v. 206, n. 4, p. 173, 2024.

GOMES, L.; SIMÕES, S. J.; DALLA NORA, E. L.; SOUSA-NETO, E. R.; FORTI, M. C.; OMETTO, J. P. H. Agricultural expansion in the Brazilian Cerrado: increased soil and nutrient losses and decreased agricultural productivity. **Land**, v. 8, n. 1, p. 12, 2019.

GOTZ, L. F.; PIOVESAN, F.; CASTAMANN, A. Rock powder and organic fertilization in soil cultivated with black bean. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 19, n. 3, p. 296-301, 2020.

IANNUCCI, A.; CANFORA, L.; NIGRO, F.; VITA, P.; BELEGGIA, R. Relationships between root morphology, root exudate compounds and rhizosphere microbial community in durum wheat. **Applied Soil Ecology**, v. 158, p. 103781, 2021.

IMRAN, A.; HAKIM, S.; TARIQ, M.; NAWAZ, M. S.; LARAIB, I.; GULZAR, U.; AHMAD, M. Diazotrophs for lowering nitrogen pollution crises: looking deep into the roots. **Frontiers in Microbiology**, v. 12, p. 637815, 2021.

IMRAN, A; ORTAS, I. Mechanism in soil health improvement with soil microbial actions and its role in potential agriculture. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.56, p. 1-22, 2025.

INDRAPRIYADHARSHINI, S.; KARTHIKEYAN, S.; KANNAN, C. Phosphate solubilizing bacteria and its application. **Canadian Journal of Clinical Pharmacology**, v. 31, n. 11, p. 687-693, 2024.

JING, T.; LI, J.; HE, Y.; SHANKAR, A.; SAXENA, A.; TIWARI, A.; AWASTHI, M. K. Role of calcium nutrition in plant physiology: Advances in research and insights into acidic soil conditions - A comprehensive review. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 210, p. 108602, 2024.

JOSE, J. V. Physiological and molecular aspects of macronutrient uptake by higher plants. *In:* KHAN, M. S. (org.). **Sustainable plant nutrition**. Academic Press, 2023. p. 1-21.

KALAMULLA, R.; YAPA, N. Co-inoculation of AMF and other microbial biofertilizers for better nutrient acquisition from the soil system. *In:* KALAMULLA, R.; YAPA, N. (ed.). **Advances in soil microbiology: a comprehensive guide to sustainable agriculture**. Singapore: Springer, p. 99-111, 2024.

KOHLER, J.; CARAVACA, F.; CARRASCO, L.; ROLDÁN, A. Contribution of *Pseudomonas mendocina* and *Glomus intraradices* to aggregate stabilization and promotion of biological fertility in rhizosphere soil of lettuce plants under field conditions. **Soil Use and Management,** v. 22, n. 3, p. 298-304, 2006.

KUMAWAT, N.; KUMAR, R.; KUMAR, S.; MEENA, V. S. Nutrient solubilizing microbes (NSMs): its role in sustainable crop production. *In:* MEENA, V. S. *et al*. (ed.). **Agriculturally important microbes for sustainable agriculture.** Singapore: Springer Singapore, 2017. p. 25-61.

LACERDA, E. G.; SANCHES, L. F. J.; QUEIROZ, J. O.; SILVA, C. P. Adubação nitrogenada no vigor das mudas, concentração de aminoácidos e proteínas totais e no teor de clorofila no feijão-de-corda (*Vigna unguiculata*). **Agri-Environmental Sciences**, v. 6, p. 11, 2020.

LAMBERS, H.; COSTA, P. B.; OLIVEIRA, R. S.; SILVEIRA, F. A. Towards more sustainable cropping systems: lessons from native Cerrado species. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 32, n. 3, p. 175-194, 2020.

LEITE, R. C.; CARNEIRO, J. S. S.; FREITAS, G. A.; CASALI, M. E.; SILVA, R. R. Adubação fosfatada na soja durante três safras consecutivas na nova fronteira agrícola brasileira. **Random Structures and Algorithms**, v. 18, n. 4, p. 28-35, 2017.

LI, Q.; WANG, L.; FU, Y., LIN, D.; HOU, M.; LI, X.; WANG, Z. Transformation of soil organic matter subjected to environmental disturbance and preservation of organic matter bound to soil minerals: a review. **Journal of Soils and Sediments**, v. 23, n. 3, p. 1485-1500, 2023.

LONGATTI, S. M.; MARRA, L. M.; MOREIRA, F. M. S. Evaluation of plant growth-promoting traits of Burkholderia and Rhizobium strains isolated from Amazon soils for their co-inoculation in common bean. **African Journal of Microbiology Research**, v. 7, n. 11, p. 948-959, 2013.

MARRA, L. M.; OLIVEIRA, S. M. D.; SOARES, C. R. F. S.; MOREIRA, F. M. D. S. Solubilisation of inorganic phosphates by inoculant strains from tropical legumes. **Scientia Agricola**, v. 68, n. 5, p. 603-609, 2011.

MARTINS, R. N. L.; NÓBREGA, R. S. A.; SILVA, A. F. T.; NÓBREGA, J. C. A.; AMARAL, F. H. C.; COSTA, E. M.; LUSTOSA FILHO, J. F.; MARTINS, L. V. Nitrogênio

e micronutrientes na produção de grãos de feijão-caupi inoculado. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n.4, p.1577-1586, 2013.

MATEUS, G. P.; BORGHI, E.; CASTRO, G. S. A.; GARCIA, R. A.; CRUSCIOL, C. A. C. Produção de biomassa e acúmulo de nutrientes na parte aérea de plantas de sorgo da Guiné Gigante. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 4, p. 1000-1008, 2011.

MAURYA; P. K.; BAHADUR; V.; SHUKLA; P. K.; TOPNO; S. E.; THAKUR; G. Response of nano NPK on growth, yield and quality of french bean (*Phaseolus vulgaris* l.). **Plant Archives**, v. 24, n. 2, p. 931-935, 2024.

MELO, V. F.; UCHÔA, S. C. P.; DIAS, F. O.; BARBOSA, G. F. Doses de basalto moído nas propriedades químicas de um Latossolo Amarelo distrófico da savana de Roraima. **Acta Amazonica**, v. 42, n. 4, p. 471-476, 2012.

MENDOZA-SUÁREZ; M.; ANDERSEN; S. U.; POOLE; P. S.; SÁNCHEZ-CAÑIZARES; C. Competition, nodule occupancy, and persistence of inoculant strains: key factors in the rhizobium-legume symbioses. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 690567, 2021.

MIGLANI, G. S.; KAUR, R.; SHARMA, P.; GUPTA, N. Leveraging photosynthetic efficiency toward improving crop yields. **Journal of Crop Improvement**, v. 35, n. 3, p. 361-402, 2021.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; MURAOKA, T.; CARMO, C. A. F. S.; MELO, W. J. Análise química de tecido vegetal. *In:* SILVA, F. C. **Manual de análises de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa, 2009, p. 191-234.

MURTAZA, G.; AHMED, Z.; ELDIN, S. M.; ALI, B.; BAWAZEER, S.; USMAN, M.; TARIQ, A. Biochar-soil-plant interactions: A cross talk for sustainable agriculture under changing climate. **Frontiers in Environmental Science**, v. 11, p. 1059449, 2023.

NABI, M. Role of microorganisms in plant nutrition and soil health. *In:* GUPTA, V. K.; SENGUPTA, A.; PAGANO, M. C.; HOUBRAKEN, J. (ed.). **Advanced concepts in plant pathology**. London: Elsevier, 2023. p. 263-282.

NADER, A.; HAUKA, F.; AFIFY, A.; EL-SAWAH, A. M. Drought-tolerant bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi mitigate the detrimental effects of drought stress induced by withholding irrigation at critical growth stages of soybean (*Glycine max* L.). **Microorganisms**, v. 12, n. 6, p. 1123, 2024.

NÉGREL; P.; LADENBERGER; A.; REIMANN; C.; BIRKE; M.; DEMETRIADES; A.; SADEGHI; M.; GEMAS PROJECT TEAM. GEMAS: Phosphorus in European agricultural soil-sources versus sinks at the continental-scale-the geological perspective. **Science of the total environment**, v. 930, p. 172524, 2024.

NUNES; J. S.; ARAÚJO; A. S. F.; NUNES; L. A. P. L.; LIMA; L. M.; CARNEIRO; R. F. V.; SALVIANO; A. A. C.; TSAI; S. M. Impact of land degradation on soil microbial biomass and activity in Northeast Brazil. **Pedosphere**, v. 22, n. 1, p. 88-95, 2012.

NYAGA, J. W.; NJERU, E. M. Potential of native rhizobia to improve cowpea growth and production in semiarid regions of Kenya. **Frontiers in Agronomy**, v. 2, p. 606293, 2020.

PATEL, P.; PANCHAL, K. Effect of free-living nitrogen fixing and phosphate solubilizing bacteria on growth of *Gossypium hirsutum* L. **Asian Journal of Biological and Life Sciences**, v. 9, n. 2, p. 169, 2020.

QIQIGE, B.; LIU, Y.; TIAN, Y.; LIU, L.; GUO, W.; WANG, P.; LI, J. Biotic and abiotic factors on rhizosphere microorganisms in grassland ecosystems. **Microorganisms**, v. 13, n. 12, p. 2645, 2025.

R CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2023.

RAHIM, H. U.; ALI, W.; UDDIN, M., AHMAD, S.; KHAN, K., BIBI, H.; ALATALO, J. M. Abiotic stresses in soils, their effects on plants, and mitigation strategies: a literature review. **Chemistry and Ecology**, v. 41, n. 4, p. 552-585, 2025.

RAO, V.; ASHWIN, R; BAGYARAJ, D. J. Synergistic effects of NPK bacteria, arbuscular mycorrhizal fungi and biochar on tomato seedling growth and organic carbon in substrate. **Deleted Journal**, v. 45. n.1, p. 5-16, 2025.

RAWAT, P.; DAS, S.; SHANKHDHAR, D.; SHANKHDHAR, S. C. Phosphate-solubilizing microorganisms: mechanism and their role in phosphate solubilization and uptake. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, n. 1, p. 49-68, 2021.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ VENEGAS, V. H. (ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**: 5ª aproximação. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359 p.

RIBEIRO; I. D. A.; VOLPIANO; C. G.; VARGAS; L. K.; GRANADA; C. E.; LISBOA; B. B.; PASSAGLIA; L. M. P. Use of mineral weathering bacteria to enhance nutrient availability in Crops: A review. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 590774, 2020.

ROBERT, C. A. M.; HIMMIGHOFEN, P.; MCLAUGHLIN, S.; COFER, T. M.; KHAN, S. A.; SIFFERT, A.; SASSE, J. Environmental and biological drivers of root exudation. **Annual Review of Plant Biology**, v. 76, 2025.

RODRIGUES, L. N. F.; BORGES, W. L. B.; MODESTO, V. C.; RIBEIRO, N. A. A.; SOUZA JUNIOR, N. C.; GIRARDI, V. A. M.; MATOS, A. M. S.; SILVA, B. P. C. S.; GALINDO, F. S.; ANDREOTTI, M. Use of soil remineralizer to replace conventional fertilizers: effects on soil fertility, enzymatic parameters, and soybean and sorghum productivity. **Agriculture**, v. 14, n. 12, p. 2153, 2024.

RUÍZ-HERRERA, L. F.; SHANE, M. W.; LÓPEZ-BUCIO, J. Nutritional regulation of root development. **Wiley Interdisciplinary Reviews-Developmental Biology**, v.4, n.4, p. 431-443, 2015.

SALE, P.; TAVAKKOLI, E.; TAVAKKOLI, E.; TAVAKKOLI, E.; ARMSTRONG, R.; WILHELM, N.; TANG, C.; DESBIOLLES, J.; MALCOLM, B.; O'LEARY, G.; DEAN, G.; DAVENPORT, D.; HENTY, S.; HART, M. Ameliorating dense clay subsoils to increase the yield of rain-fed crops. **Advances in Agronomy**, v. 165, p. 249-300, 2021.

SALEEM, M.; LAW, A. D.; SAHIB, M. R.; PERVAIZ, Z. H.; ZHANG, Q. Impact of root system architecture on rhizosphere and root microbiome. **Rhizosphere**, v. 6, p. 47-51, 2018.

SANTOS, L. A. C.; DA SILVA, D. M. P.; DE OLIVEIRA, I. A.; PEREIRA, C. E.; CAMPOS, M. C. C. Growth of cowpea cultivars in upland and lowland soils. **Ambiência**, v. 13, n. 1, p. 261-270, 2017.

SANTOS; H. G.; JACOMINE; P. K. T.; ANJOS; L.H.C.; OLIVEIRA; V.A.; LUMBRERAS; J.F.; COELHO; M. R... CUNHA; T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SCHAEFER, C. E. G. R.; FABRIS, J. D.; KER, J. C. Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): a review. **Clay Minerals**, v. 43, n. 1, p. 137-154, 2008.

SCHAEFER, C. E. G. R.; SIQUEIRA, R. G.; PEREIRA, L. F.; GOMES, L. C.; ALMEIDA, P. H. A.; FRANCELINO, M. R.; FERNANDES-FILHO, E. I. Brazilian Latossolos (Ferralsols, Oxisols) from different biomes: a multiproxy study on the spatial variability of the most weathered tropical soils in South America. **Geoderma Regional**, p. e01012, 2025.

SETIAWATI, T. C.; ERWIN, D.; MANDALA, M.; HIDAYATULAH, A. Use of Bacillus as a plant growth-promoting rhizobacteria to improve phosphate and potassium availability in acidic and saline soils**. Kne Life Sciences**, v. 7, n. 3, p. 541-558, 2022.

SGARBI, G. N. Arenitos eólicos da formação areado (Bacia Cretácea do São Francisco): caracterização, diagênese e aspectos químicos. **Revista Brasileira deGeociências**, v. 21. n.4, p.342-354, 1991.

SHEORAN, A. R.; LAKRA, N.; SAHARAN, B. S.; LUHACH, A.; KUMAR, R.; SETH, C. S.; DUHAN, J. S. Enhancing plant disease resistance: insights from biocontrol agent strategies. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 44, n. 2, p. 436-459, 2025.

SILVA, V. N.; SILVA, L. E. S. F.; MARTINEZ, C. R.; SELDIN, L.; BURITY, H. A.; FIGUEIREDO, M. V. B. Strains of paenibacillus promoters of the specific nodulation in the symbiosis Bradyrhizobium caupi. **Applied Soil Ecology**, v. 29, n. 3, p. 331-338, 2007.

SILVA; S. H. G.; RIBEIRO; B. T.; GUERRA; M. B. B.; CARVALHO; H. W. P.; LOPES; G.; CARVALHO; G. S.; GUILHERME; L.R.G.; RESENDE; M.; MANCINI; M.; ... WEINDORF; D. C. pXRF in tropical soils: Methodology, applications, achievements and challenges. **Advances in agronomy**, v. 167, p. 1-62, 2021.

SINGH, V. K.; SINGH, A. K.; SINGH, P. P.; KUMAR, A. Interaction of plant growth promoting bacteria with tomato under abiotic stress: a review. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 267, p. 129-140, 2018.

SIQUEIRA, J. A. C.; MARQUES, D. J.; SILVA, M. C. G.; SILVA, C. A. The use of photosynthetic pigments and SPAD can help in the selection of bean genotypes under fertilization organic and mineral. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 22610, 2023.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 13th ed. Washington, DC: USDA, 2022. 401 p.

SOUZA, J. S.; MARTINS, A. F.; PEDROSA, L. M. Importância de bactérias fixadoras de nitrogênio no cultivo do feijão-caupi *Vigna unguiculata* L. (Walp.). **Scientific Electronic Archives**, v. 14, n. 9, p. 1456, 2021.

SOUZA; L. F. R.; SOUZA JÚNIOR; N. C.; FERNANDES; G. C.; ITO; W. C. N.; BARBOSA; M. C.; FREITAS; L. B.; SOUZA; K.S.; ALEXANDRE; L.S.; SILVA; M. B.; SILVA; E.C.; NASCIMENTO; V. Response of *Phaseolus vulgaris* to the use of growth-promoting microorganisms associated with the reduction of npk fertilization in tropical soils: Clayey oxisol and sandy ultisol. **Agriculture**, v. 15, n.1, p. 63, 2024.

SPARKS, E. E.; BENFEY, P. N. The contribution of root systems to plant nutrient acquisition. *In*: SPARKS, E. E.; BENFEY, P. N. (ed.). **The plant cell wall: biochemistry, structure and function**. London: Academic Press, 2017. p. 83-92.

TAIZ; L.; ZEIGER; E.; MØLLER; I. M.; MURPHY; A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). **Manual de métodos de análise de solos**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

ULÉN, B.; ETANA, A. Phosphorus leaching from clay soils can be counteracted by structure liming. **Acta Agriculturae Scandinavica Section B – Soil and Plant Science**, v. 64, n. 5, p. 425-433, 2014.

USEPA. **Method 6200: Field portable X-ray fluorescence spectrometry for the determination of elemental concentrations in soil and sediment**. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 2007. Disponível em: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/6200.pdf. Acesso em: 20 nov. 2025.

VALLADARES, G. S.; RIBEIRO JÚNIOR, A. F.; AQUINO, C. M. S. Caracterização de solos no núcleo de desertificação de Gilbués, Piauí, Brasil, e sua relação com os processos de degradação. **Physis Terrae - Revista Ibero-Afro-Americana de Geografia Física e Ambiente**, v. 2, n. 1, p. 115-135, 2020.

VISHWAKARMA, K.; KUMAR, N., SHANDILYA, C., MOHAPATRA, S., BHAYANA, S.; VARMA, A. Revisiting plant–microbe interactions and microbial consortia application for enhancing sustainable agriculture: a review. **Frontiers in Microbiology**, v. 11, p. 560406, 2020.

WANG; Y.; JI; H.; WANG; R.; GUO; S. Responses of nitrification and denitrification to nitrogen and phosphorus fertilization: does the intrinsic soil fertility matter? **Plant and Soil**, v.440, n.1, p. 443-456, 2019.

WEINDORF, D. C.; CHAKRABORTY, S. Portable X-ray fluorescence spectrometry analysis of soils. **Methods of Soil Analysis**, v. 1, n. 1, p. 1-15, 2016.

XIE, K.; XIE, K.; CAKMAK, I.; WANG, S.; ZHANG, F.; ZHANG, F.; GUO, S.; GUO, S. Synergistic and antagonistic interactions between potassium and magnesium in higher plants. **The Crop Journal**, v. 9, n. 2, p. 249-256, 2021.

YANG, Y.; QIU, K.; XIE, Y.; LI, X., ZHANG, S.; LIU, W.; BAO, P. Geographical, climatic, and soil factors control the altitudinal pattern of rhizosphere microbial diversity and its driving effect on root zone soil multifunctionality in mountain ecosystems. **Science of the Total Environment**, v. 904, p. 166932, 2023.

ZIRAK-QOTURBULAGH, M. A.; MEHRI, S.; SOLEIMANZADEH, H.; ANSARI, M. H. Co-Inoculation of Bradyrhizobium and arbuscular mycorrhizal fungus alleviates the effects of drought stress in soybean (*Glycine max* L.). **Turkish Journal Of Field Crops**, v. 30, n. 1, p. 235-248, 2025.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Os achados da pesquisa indicam que o material saprolítico do Núcleo de Desertificação de Gilbués apresenta potencial como fonte de nutrientes para sistemas agrícolas sustentáveis, porém seu uso deve ser compreendido como uma estratégia complementar e de médio a longo prazo, e não como substituto imediato da adubação mineral em cultivos de ciclo curto, como o feijão-caupi. A associação desse material com microrganismos promotores de crescimento vegetal pode contribuir para otimizar seus efeitos, desde que consideradas as condições edáficas e o tempo necessário para a manifestação dos processos biogeoquímicos envolvidos.

Os resultados obtidos apontam para a necessidade de estudos de longa duração, para avaliar a liberação de nutrientes do saprolito, seus efeitos cumulativos sobre a fertilidade do solo e sua contribuição para o acúmulo de nutrientes e a produtividade das culturas ao longo de ciclos sucessivos de cultivo.

A realização de experimentos em condições de campo permitirá validar os resultados obtidos em ambiente protegido, considerando a influência de fatores climáticos, da variabilidade espacial do solo e das interações mais complexas. Além disso, avaliações envolvendo doses graduais do saprolito e diferentes estratégias de parcelamento poderão contribuir para identificar manejos mais eficientes do material. Outra perspectiva relevante envolve o aprofundamento na seleção e na combinação de estirpes bacterianas.

Por fim, a avaliação do uso do material saprolítico em outras culturas de maior ciclo pode ampliar o entendimento de seu potencial uso, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias sustentáveis de manejo do solo, especialmente em regiões vulneráveis à degradação, como o sul do Piauí.

APÊNDICES

Fatores de variação	Quadrados médios			
	AP	DC	NT	AF
Condições de cultivo (CC)	135,59*	5,93*	13,98*	404,53*
Inoculação (I)	24,49ns	0,19ns	0,45 ns	11457,33 ns
EA * I	10,79 ns	0,20ns	1,22 ns	12742,46 ns
CV (%)	15,38	10,06	18,33	34,39
	MSR	MST	CR	VR
Condições de cultivo (CC)	1,77*	66,47*	2767,80*	323,29*
Inoculação (I)	0,127ns	1,84ns	812,33*	17,87ns
EA * I	0,14*	5,04*	395,66ns	14,38*
CV (%)	24,75	23,09	32,2	24,36
	IRCa	IRCb	IRCt	MSPA
Condições de cultivo (CC)	441,70*	436,86*	1755,80*	47,02*
Inoculação (I)	12,37ns	19,34	61,53 ns	1,34 ns
EA * I	12,67*	18,93	53,98 ns	3,83*
CV (%)	6,06	19,8	9,7	26,93
	ND	MSN	EFA	EFI
Condições de cultivo (CC)	1915,76*	0,032*	546,40ns	18394,4*
Inoculação (I)	977,566*	0,003*	1,134ns	5595,00*
EA * I	431,86*	0,003*	1358,46ns	1077ns
CV (%)	30,04	27,21	28,95	26,57

Apêndice 1 - Quadro de análise de variância referente as variáveis de desenvolvimento do feijão-caupi cultivado em Latossolo Amarelo franco-arenoso. AP: altura de planta, DC: Diâmetro do caule, NT: Número de trifólios, AF: Área foliar, IRCa: Índice relativo de clorofila *a*, IRCb: Índice relativo de clorofila *b*, IRCt: Índice relativo de clorofila total MSPA: Massa seca da parte aérea, MSR: Massa seca da raiz, MST: Massa seca total, CR: Comprimento da raiz, VR: Volume da raiz, ND: Número de nódulos, MSN: Massa seca de nódulos, EFA: Eficácia, EFI: Eficiência. CV: coeficiente de variação. * e ns: significativo e não significativo pelo teste F ($p<0,05$).

Fatores de variação	Quadrados médios			
	pH	Ca	Mg	K
Condições de cultivo (CC)	32,92*	3094,92*	56,98*	0,16*
Inoculação (I)	0,08ns	4,10ns	0,04ns	0,001ns
EA * I	0,08*	2,27ns	0,01ns	0,001ns
CV (%)	2,87	13,61	14,32	20,33
	T	V%	m%	MO
Condições de cultivo (CC)	4037,26*	6791*	875,80*	0,04*
Inoculação (I)	4,23ns	52,66ns	9,90ns	0,002ns
EA * I	2,36 ns	23,66ns	31,34ns	0,001ns
CV (%)	11,77	5,18	31,54	20,11
	P	Al	H+Al	SB
Condições de cultivo (CC)	7629,60*	0,28*	1,57*	4041,48*
Inoculação (I)	23,00ns	0,003ns	0,06*	4,90ns
EA * I	11,33ns	0,01ns	0,04*	2,61ns
CV (%)	28,34	34,01	9,75	12,9
	Cu	Mn	Fe	Zn
Condições de cultivo (CC)	0,18*	593,88*	4311160,2*	3,27*
Inoculação (I)	0,008ns	1,83ns	18982ns	0,07ns
EA * I	0,006ns	11,47ns	17401,93ns	0,04ns
CV (%)	29,09	30,39	11,34	23,9

Apêndice 2 - Quadro de análise de variância referente as variáveis de fertilidade do solo do experimento conduzido em Latossolo Amarelo franco-arenoso. Ca: cálcio; Mg: magnésio; K: potássio; P: fósforo; Al: alumínio; H+AL: acidez potencial; SB: soma de bases; T: CTC potencial; V: saturação de bases; m: saturação por alumínio; t: CTC efetiva; MO: matéria orgânica, Cu: cobre; Mn: manganês; Fe: ferro e Zn: zinco. CV: coeficiente de variação. * e ns: significativo e não significativo pelo teste F ($p<0,05$).

Fatores de variação	Quadrados médios				
	Parte aérea				
	N	P	K	Ca	Mg
Condições de cultivo (CC)	129,48*	11,17*	116,93*	189,52ns	1019,2*
Inoculação (I)	9,47ns	0,209ns	14,79ns	207,1ns	9,67*
EA * I	11,02ns	0,283ns	12,49ns	338,12ns	4,15ns
CV (%)	12,18	18,77	23,33	27,83	24,78
	Cu	Mn	Fe	Zn	
Condições de cultivo (CC)	0,186*	1019,2*	346,44*	16,11*	
Inoculação (I)	0,008ns	66,6*	81,3*	1,31*	
EA * I	0,006ns	35,13*	87,63*	0,55ns	
CV (%)	29,09	22,48	27,97	10,32	
	Raiz				
	N	P	K	Ca	Mg
Condições de cultivo (CC)	15,94ns	0,50*	25,71*	11,87*	0,47*
Inoculação (I)	59,96*	0,02ns	6,66*	3,20ns	0,19ns
EA * I	43,12ns	0,02ns	4,37*	2,54*	0,23*
CV (%)	27,55	22,28	36,15	33,14	24,7
	Cu	Mn	Fe	Zn	
Condições de cultivo (CC)	3,37*	6,30*	688,66*	0,21*	
Inoculação (I)	0,21*	0,46*	6,44*	0,10*	
EA * I	0,07*	0,62*	532,66*	0,07*	
CV (%)	28,1	27,57	23,37	31,12	

Apêndice 3 - Quadro de análise de variância referente ao acúmulo de nutriente na parte aérea e na raiz do feijão-caupi cultivado em Latossolo Amarelo franco-arenoso. N: nitrogênio; P: fósforo; K: potássio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Cu: cobre; Mn: manganês; Fe: ferro e Zn: zinco. CV: coeficiente de variação. * e ns: significativo e não significativo pelo teste F ($p<0,05$).

Fatores de variação	Quadrados médios			
	AP	DC	NT	AF
Condições de cultivo (CC)	51,62*	1,26*	9,06*	26944,12*
Inoculação (I)	1,70ns	0,01ns	1,53ns	4742,81*
EA * I	3,35ns	0,11ns	0,89ns	4454,16*
CV (%)	14,06	11,26	31,45	44,20
	MSR	MST	CR	VR
Condições de cultivo (CC)	0,38*	9,53*	1171,69*	63,29*
Inoculação (I)	0,03*	0,27ns	85,95*	5,82*
EA * I	0,02*	0,36*	25,62*	2,87*
CV (%)	30,60	34,11	17,26	19,09
	IRCa	IRCb	IRCt	MSPA
Condições de cultivo (CC)	185,73*	145,72*	654,07*	6,11*
Inoculação (I)	22,88 ns	19,17 ns	82,591ns	0,16ns
EA * I	45,52ns	18,05ns	114,52ns	0,25*
CV (%)	20,16	39,66	23,59	40,46
	ND	MSN	EFA	EFI
Condições de cultivo (CC)	1300,71*	0,000385*	17537,60*	9341,95*
Inoculação (I)	74,48*	0,000026*	553,13ns	516,15ns
EA * I	48,82*	0,000016*	515,99*	2809,43*
CV (%)	40,39	52,65	38,98	29,76

Apêndice 4 - Quadro de análise de variância referente as variáveis de desenvolvimento do feijão-caupi cultivado em Latossolo Amarelo argilo-arenoso. AP: altura de planta, DC: Diâmetro do caule, NT: Número de trifólios, AF: Área foliar, IRCa: Índice relativo de clorofila *a*, IRCb: Índice relativo de clorofila *b*, IRCt: Índice relativo de clorofila total MSPA: Massa seca da parte aérea, MSR: Massa seca da raiz, MST: Massa seca total, CR: Comprimento da raiz, VR: Volume da raiz, ND: Número de nódulos, MSN: Massa seca de nódulos, EFA: Eficácia, EFI: Eficiência. CV: coeficiente de variação. * e ns: significativo e não significativo pelo teste F ($p<0,05$).

Fatores de variação	Quadrados médios			
	pH	Ca	Mg	K
Condições de cultivo (CC)	16,72*	2027,87*	44,64*	0,08*
Inoculação (I)	0,07ns	9,62ns	0,14ns	0,002ns
EA * I	0,11ns	11,85*	0,19ns	0,004ns
CV (%)	3,97	28,46	30,25	42,19
	T	V%	m%	MO
Condições de cultivo (CC)	2544,08*	4094,01*	0,000ns	0,04*
Inoculação (I)	11,88ns	15,13ns	0,000ns	0,006*
EA * I	14,97*	10,91ns	0,000ns	0,009*
CV (%)	24,70	8,32	0,0	32,60
	P	Al	H+Al	SB
Condições de cultivo (CC)	10124,83*	0,000ns	6,36*	2688,91*
Inoculação (I)	430,55*	0,000ns	0,0031ns	11,77ns
EA * I	335,54*	0,000ns	0,099ns	14.96*
CV (%)	32,46	0,0	30,01	28,12
	Cu	Mn	Fe	Zn
Condições de cultivo (CC)	2,66*	1125,33*	24038*	2,86*
Inoculação (I)	0,03ns	24,35ns	69,27ns	0,05ns
EA * I	0,01ns	25,95*	117,02ns	0,04ns
CV (%)	14,53	35,34	18,78	27,84

Apêndice 5 - Quadro de análise de variância referente as variáveis de fertilidade do solo do experimento conduzido em Latossolo Amarelo argilo-arenoso. Ca: cálcio; Mg: magnésio; K: potássio; P: fósforo; Al: alumínio; H+AL: acidez potencial; SB: soma de bases; T: CTC potencial; V: saturação de bases; m: saturação por alumínio; t: CTC efetiva; MO: matéria orgânica, Cu: cobre; Mn: manganês; Fe: ferro e Zn: zinco. CV: coeficiente de variação. * e ns: significativo e não significativo pelo teste F ($p<0,05$).

Fatores de variação	Quadrados médios				
	Parte aérea				
	N	P	K	Ca	Mg
Condições de cultivo (CC)	638,69*	0,21*	128,12*	29,70*	1,77ns
Inoculação (I)	78,23*	0,04*	8,40ns	15,63ns	0,83ns
EA * I	58,79*	0,02*	13,36*	24,07*	0,74ns
CV (%)	11,57	32,50	28,07	23,87	28,95
	Cu	Mn	Fe	Zn	
Condições de cultivo (CC)	1,98*	341,80*	3272,44*	6,83*	
Inoculação (I)	0,37*	19,50ns	1309,22*	0,30ns	
EA * I	0,36*	23,58*	4111,79*	0,59ns	
CV (%)	39,87	24,03	47,23	33,09	
	Raiz				
	N	P	K	Ca	Mg
Condições de cultivo (CC)	270,77*	0,10*	10,22*	7,04*	1,52*
Inoculação (I)	183,10*	0,005ns	0,37ns	0,50*	0,08*
EA * I	92,14*	0,003ns	0,17ns	0,49*	0,03ns
CV (%)	7,81	13,91	27,44	12,81	20,09
	Cu	Mn	Fe	Zn	
Condições de cultivo (CC)	2,32*	16,89*	869,20*	0,04*	
Inoculação (I)	0,42*	1,21*	293,17*	0,01*	
EA * I	0,25*	0,28*	97,71*	0,06*	
CV (%)	55,27	39,60	33,03	44,88	

Apêndice 6 - Quadro de análise de variância referente ao acúmulo de nutriente na parte aérea e na raiz do feijão-caupi cultivado em Latossolo Amarelo argilo-arenoso. N: nitrogênio; P: fósforo; K: potássio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Cu: cobre; Mn: manganês; Fe: ferro e Zn: zinco. CV: coeficiente de variação. * e ns: significativo e não significativo pelo teste F ($p<0,05$).