

ANTONIO MARCOS GOMES LISBÔA

BIOFERTTILIZANTES DE NANOPARTÍCULAS CARBONÁCEAS E ISOLADOS  
RIZOBIANOS COMO INCREMENTO NA PRODUTIVIDADE DO FEIJÃO-CAUPI  
(*Vigna unguiculata* (L.) WALP.) NO SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO

Serra Talhada-PE

2024

L  
I  
S  
B  
Ô  
A

B  
I  
O  
F  
E  
R  
T  
I  
L  
I  
Z  
A  
N  
T  
E  
S

D  
E

.

.

.

2  
0  
2  
4

ANTONIO MARCOS GOMES LISBÔA

BIOFERTTILIZANTES DE NANOPARTÍCULAS CARBONÁCEAS E ISOLADOS  
RIZOBIANOS COMO INCREMENTO NA PRODUTIVIDADE DO FEIJÃO-CAUPI  
(*Vigna unguiculata* (L.) WALP.) NO SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dra. Carolina Etienne de Rosália e Silva Santos

Coorientador: Prof. Dra. Ana Dolores Santiago de Freitas

Serra Talhada-PE

2024

# FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Sistema Integrado de Bibliotecas

Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

L769b    Lisbôa, Antonio Marcos Gomes

Biofertilizantes de nanopartículas carbonáceas e isolados rizobianos como incremento na produtividade do feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) no semiárido Pernambucano / Antonio Marcos Gomes Lisbôa. - 2024.  
89 f. : il.

Orientador: Carolina Etienne de Rosalia e Silva Santos.

Coorientador: Ana Dolores Santiago de Freitas.

Inclui referências e apêndice(s).

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, , Serra Talhada, 2024.

1. Sustentabilidade. 2. fixação biológicas de nitrogênio. 3. nanofertilizantes. 4. mineral de plantas. 5. viabilidade econômica. I. Santos, Carolina Etienne de Rosalia e Silva, orient. II. Freitas, Ana Dolores Santiago de, coorient. III. Título

CDD

---

ANTONIO MARCOS GOMES LISBÔA

BIOFERTTILIZANTES DE NANOPARTÍCULAS CARBONÁCEAS E ISOLADOS  
RIZOBIANOS COMO INCREMENTO NA PRODUTIVIDADE DO FEIJÃO-CAUPI  
(*Vigna unguiculata* (L.) WALP.)) NO SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

APROVADO em 25/06/2024.

Banca Examinadora

---

Prof. Dra. Carolina Etienne de Rosália e Silva Santos – UAST/UFRPE

Orientador

---

Prof. Dr. Alezandre Campelo de Oliveira – UFRPE

Examinador Interno

---

Dra. Jéssica Rafaella de Sousa Oliveira – UFRPE

Examinador Externo

*“Dedico esta dissertação a todos que, apesar de não terem acesso à educação, jamais desistiram de aprender. Vocês são a essência da resiliência e esperança. E aos que, desafiando enormes barreiras e indo contra a estatística que lhes foi atribuída, conquistaram a pós-graduação, minha profunda admiração e respeito. Que este trabalho celebre suas lutas incansáveis e inspire todos os sonhadores a nunca desistirem.”*

Dedico

## AGRADECIMENTOS

Iniciarei os meus agradecimentos citando o versículo do Salmo 121: **“Levantarei os meus olhos para os montes, de onde vem o meu socorro. O meu socorro vem do Senhor que fez o céu e a terra”**. Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido o privilégio de fazer uma pós-graduação, e que mesmo diante de todo contratempo, eu senti sua presença em toda à jornada. Quero agradecer aos meus familiares, em especial aos meus irmãos Michelly Fernanda, Charles Henrique, José Rildo e Maria Vitória, a minha tia/mãe Adermar Doralice que me criou como filho, e minha mãe Laudemira Gomes, ao meu pai do coração Jean Cruz, aos demais primos (irmãos de criação), agradeço por acreditarem em mim. Quero agradecer aos amigos que o mestrado me proporcionou e foram muito importantes para execução da pesquisa, Jamiles Henrique, Lucas Pierre, Ângela Lucena, Jheyne Carvalho, David Moureira, Rodrigo Hemerson, Bianca Potfílio, Nerissa, e aos amigos que ajudaram indiretamente, Jandis, Leronardo, Luiz Filipe, Natalia, Juliana. Quero agradecer aos amigos da vida, Maria Gomes, Nathielly Sá, Walderme Alves, Cayilane Soares, Amanda Soares, Leandro Ciprinano, Douglas Correia, Jamiles Rodrigues e Erica Albuquerque, por todo suporte psicológico fornecido sempre que precisei. Quero agradecer à minha orientadora Carolina Etienne de Rosália, por suas palavras de incentivos, e contribuições significativas para a execução deste projeto e, juntamente a ela, quero agradecer a todos que fazem parte do grupo de fixação biológica de nitrogênio em especial Pablo, Bruno, Jéssica e minha coorientadora Ana Dolores, por participaram de forma direta e indireta para a realização da pesquisa, agradeço ao grupo Fixação Biológica de Nitrogênio - FBN pela disposição em ajudar cientificamente. Agradeço também a empresa Krilltech pelo financiamento de algumas análises e pela disponibilidade dos biofertilizantes. Agradeço a Universidade Federal Rural de Pernambuco pelo uso das intermediações, ao IPA pelo fornecimento do feijão-caupi, a FACEPE pela concessão da bolsa. Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, e ao corpo docente por dividir conhecimento comigo.

Todo mundo merece deveria ser aplaudido de pé pelo menos uma vez na vida, porque todos  
nós vencemos o mundo.  
(August Pullman)

## RESUMO

A região nordeste é composta por diversos solos, entre eles os arenosos, que é caracterizada por apresentar baixo teor de matéria orgânica, o que provoca a insuficiência de nitrogênio nestes solos. Objetivou avaliar a influência de nanopartículas carbonáceas, e avaliação de novas cepas rizobianas como inoculante mais eficientes e adaptáveis, como alternativa de fertilização que possibilitem aumentar de forma sustentável o desempenho agrônomo, desenvolvimento da cultura e viabilidade econômica do feijão-caupi em condições de clima semiárido. O experimento foi conduzido no período de agosto a outubro de 2023 na área experimental da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UAST), em Serra Talhada – PE, Pernambuco, Brasil. O delineamento utilizado foi em blocos ao acaso em parcelas subdivididas. Os tratamentos foram distribuídos em bactérias rizobianas BR 3267, NFB 16A, NFB 16B, biofertilizantes ARB 1,14, BIO 7020, BIO 50, BIO 5050, adubo nitrogenado (ureia) e controle, considerados as subparcelas. Os tratamentos foram aplicados no feijão-caupi em dois níveis de irrigação (pleno e com déficit hídrico) da necessidade da cultura, considerados as parcelas, com quatro repetições. Foram realizadas análises biométricas, acúmulo de macro e micronutrientes nos tecidos vegetais, produtividade da cultura, análises de eficiência hídrica, potencial hídrico e condutância estomática, viabilidade econômica e indicadores de eficiência hídrica. As médias foram submetidas à análise de variância (ANOVA) pelo Teste F e para os significativos, foi realizado o teste de comparação entre as médias utilizando o teste de Tuckey a 5% de probabilidade. O tratamento ARB 1,14 em plena irrigação promoveu a maior média entre os tratamentos aplicados, com 1.503,60 (kg.ha<sup>-1</sup>), representando um incremento de 24% na produtividade grãos, quando comparada com o controle. O tratamento ARB 1,14 em plena irrigação promoveu a maior média entre os tratamentos aplicados, com 1.503,60 (kg.ha<sup>-1</sup>), representando um incremento de 24% na produtividade grãos, quando comparada com o controle. O tratamento ARB 1,14 apresentou uma eficiência extração e exportação de nitrogênio e fósforo, em sistema com plena irrigação, poderia ser uma escolha preferível como biofertilizante com nanopartículas.

**Palavras-chave:** Sustentabilidade, fixação biológica de nitrogênio, nanofertilizantes, mineral de plantas, viabilidade econômica

## ABSTRACT

The northeast region is made up of different soils, including sandy soils, which are characterized by a low level of organic matter, which causes insufficient nitrogen in these soils. It aimed to evaluate the influence of carbonaceous nanoparticles, and evaluation of new rhizobial strains as more efficient and adaptable inoculants, as a fertilization alternative that makes it possible to sustainably increase the agronomic performance, crop development and economic viability of cowpea in semi-arid climate conditions. The experiment was conducted from August to October 2023 in the experimental area of the Federal Rural University of Pernambuco (UFRPE), Serra Talhada Academic Unit (UAST), in Serra Talhada – PE, Pernambuco, Brazil. The design used was randomized blocks in split plots. The treatments were distributed in rhizobial bacteria BR 3267, NFB 16A, NFB 16B, biofertilizers ARB 1.14, BIO 7020, BIO 50, BIO 5050, nitrogen fertilizer (urea) and control, considered the subplots. The treatments were applied to cowpea at two irrigation levels (full and with water deficit) of the crop's needs, considering the plots, with four replications. Biometric analyses, accumulation of macro and micronutrients in plant tissues, crop productivity, water efficiency analyses, water potential and stomatal conductance, economic viability and water efficiency indicators were carried out. The means were submitted to analysis of variance (ANOVA) using the F test and for significant ones, a comparison test between the means was carried out using the Tuckey test at 5% probability. The ARB 1.14 treatment in full irrigation promoted the highest average among the applied treatments, with 1,503.60 (kg.ha<sup>-1</sup>), representing an increase of 24% in grain productivity, when compared to the control. The ARB 1.14 treatment in full irrigation promoted the highest average among the applied treatments, with 1,503.60 (kg.ha<sup>-1</sup>), representing an increase of 24% in grain productivity, when compared to the control. The ARB 1.14 treatment showed an efficient extraction and export of nitrogen and phosphorus, in a system with full irrigation, it could be a preferable choice as a biofertilizer with nanoparticles.

**Keywords:** Sustainability, biological nitrogen fixation, nanofertilizers, plant mineral, Economic viability

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Fase fenológica do feijão-caupi.....	20
Figura 2. Modelo resumido para fixação simbiótica de nitrogênio em leguminosas por rizóbios.....	29
Figura 3. Representação Esquemática das Aplicações da Nanotecnologia nas Ciências Vegetais. (A) Nanopartículas de engenharia utilizadas como nanocarreadores para entrega de diversas cargas exógenas (B), incluindo agroquímicos e moléculas bioativas. (C) Liberação de agroquímicos mediada por nanocarreadores de maneira controlada. (D) Entrega mediada por nanocarreadores de moléculas bioativas em células vegetais. (E) Entrega de agentes fluorescentes intracelulares mediados por nanocarreadores (por exemplo, pontos quânticos ou proteínas fluorescentes) para marcação e imagem intracelular.....	33
Figura 4. Mapas da América do Sul, do Brasil e do Estado Pernambuco (A), da cidade de Serra Talhada-PE (B) e localização da área onde foi realizado o estudo (C). Área de implantação do experimento (D) (E).....	34
Figura 5. Condições ambientais e lâminas de disponibilidade hídricas via irrigação plena irrigação e déficit hídrico, em cultivo de feijão-caupi, no município de Serra Talhada -PE, Brasil.....	35
Figura 6. Croqui do delineamento da área experimental.....	37
Figura 7. Biofertilizantes e inoculantes rizobianos (A); coletando biofertilizante (B); Aplicação em regador de 10l (C); Homogeneização (D).....	38
Figura 8. Instalação do sistema de irrigação (A); Semeadura (B); Aplicação dos produtos (C).....	38
Figura 9. Comprimento foliar (A); Largura foliar (B); Comprimento da parte aérea (C); Comprimento da raiz (D).....	41
Figura 10. Comprimento da vargem (A); Peso de 100g (B); Peso das vargens (C).....	42
Figura 11. Leitura da condutância estomática (A); Leitura do potencial hídrico (B).....	43
Figura 12. Amostra foliar (A); Maceração da folha (B), Folha macerada (C); Amostras no microtubo de centrifuga (D).....	44
Figura 13. Análise de componentes principais para biometria (AP, DC, AF, TR, NFV, ND, CV, NV), biomassa (MSPA, MSR, MST) rendimento (REND. G, MSG, P100G), potencial hídrico (PH), condutância estomática (gs), enzimas antioxidantes (CAT, APX, SOD), absorção, e exportação de N, P, K, Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Mn (A); Plena irrigação x controle, ARB 1,14,	

Adubo químico, BIO50, BIO5050, BIO7020, NFB16A, NFB16B, BR3267; ); Deficit hídrico x controle, ARB 1,14, Adubo químico, BIO50, BIO5050, BIO7020, NFB16A, NFB16B, BR3267 na cultura do feijão-caupi em Serra Talhada – PE, Brasil (B).....61

Figura 14. Produtividade da água da cultura (A), produtividade econômica da água de irrigação (B) do feijão-caupi com aplicação de biofertilizantes isolados rizobianos, em condição de irrigação plena (W-100) e déficit hídrico (W-50%) para um hectare, em Serra Talhada – PE, Brasil.....62

Figura 15. Receita bruta da análise financeira de feijão-caupi com aplicação de biofertilizantes e isolados rizobianos, em condição de irrigação plena (W100%) e déficit hídrico (W50%) para um hectare, em Serra Talhada – PE, Brasil.....64

Figura 16. Receita líquida de um ciclo (A); Custo benefício de quatro ciclos (B); Custo benefício de vinte ciclos (C) da análise financeira de feijão-caupi com aplicação de biofertilizantes e isolados rizobianos, em condição de irrigação plena (W-100%) e déficit hídrico (W-50%) para um hectare, em Serra Talhada – PE, Brasil.....65

Figura 17. Relação Custo/Benefício de um ciclo (A); Custo de produção de grãos de quatro ciclo (B); Custo de produção de grãos de vinte ciclos (C) da análise financeira de feijão-caupi com aplicação de biofertilizantes e isolados rizobianos, em condição de irrigação plena (W-100%) e déficit hídrico (W-50%) para um hectare, em Serra Talhada-PE. Brasil.....67

Figura 18. Percentual do custo fixo (A), custo variável (B) da análise financeira de feijão-caupi com aplicação de biofertilizantes e bactérias rizobianas, em condição de irrigação plena (W-100%) e déficit e hídrico (W-50%) para um hectare, em Serra Talhada – PE, 2023.....69

## LISTA DE TABELAS

Caracterização dos atributos físico-químico do solo.....	40
Tabela 2. Efeito da aplicação de diferentes fertilizantes e isolados rizobianos em condição de irrigação plena e déficit na biometria altura de planta (AP), diâmetro do caule (DC), área foliar (AF), tamanho da raiz (TR), número de folha viva (NFV), número de nódulos (ND), comprimento de vargens (CV), número de vargens (NV); Na biomassa massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), massa seca total (MST); No rendimento de grão (REND.G), massa seca dos grãos (MSC), Peso de 100 grãos (P100G) no do feijão-caupi em Serra Talhada – PE, Brasil.....	51
Tabela 3. Efeito da aplicação de diferentes fertilizantes e isolados rizobianos em condição de irrigação plena e deficit nos parâmetros Fisiobioquímico potencial hídrico (PH), condutância estomática (gs), Catalase (CAT), superóxido desmutase (SOD) e ascorbato peroxidase (APX) no do feijão-caupi em Serra Talhada – PE, Brasil.....	52
Tabela 4. Absorção de N, P, K, Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Mn de diferentes fertilizantes e isolados rizobianos em condição de irrigação plena e déficit hídrico pela cultura do feijão-caupi em Serra Talhada – PE, 2023.....	53
Tabela 5. Exportação de N, P, K, Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Mn de diferentes fertilizantes e isolados rizobianos em condição de irrigação plena e déficit hídrico pela cultura do feijão-caupi em Serra Talhada – PE, 2023.....	55
Tabela 6. Exportado de N, P, K, Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Mn de diferentes fertilizantes e isolados rizobianos em condição de irrigação plena e déficit hídrico pela cultura do feijão-caupi em Serra Talhada – PE, 2023.....	57
Tabela 7. Mapa de calor efeito da aplicação de diferentes fertilizantes e isolados rizobianos em condição de irrigação plena e déficit na biometria (AP, DC, AF, TR, NFV, ND, CV, NV), biomassa (MSPA, MSR, MST) rendimento (REND. G, MSG, P100G), potencial hídrico P PH), condutância estomática (gs), enzimas antioxidantes (CAT, APX, SOD), absorção N, P, K, Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Mn pela cultura do feijão-caupi em Serra Talhada – PE, Brasil.....	59
Tabela 8. Extração da parte aérea e exportação para os grãos de N, P, K, Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Mn pela cultura do feijão-caupi em Serra Talhada – PE, 2023.....	60

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>2. OBJETIVO</b> .....	18
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
<b>3. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	19
3.1. IMPORTÂNCIA DO FEIJÃO-CAUPI .....	19
3.2. USO INDISCRIMINADO DOS FERTILIZANTES QUÍMICOS NA AGRICULTURA	23
3.3. RIZÓBIOS .....	25
<b>3.3.1. Fixação biológica de nitrogênio e sua importância econômica</b> .....	26
<b>3.4. Biofertilizantes e nanopartículas na agricultura</b> .....	29
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	34
4.1. ÁREA DE ESTUDO .....	34
4.2. DESING E TRATAMENTOS EXPERIMENTAIS .....	35
4.3. PROCEDIMENTOS DE CONDUÇÃO EXPERIMENTAL .....	37
4.4. IRRIGAÇÃO .....	39
4.5. COLETA PARA CARACTERIZAÇÃO DO SOLO.....	39
4.6. DADOS COLETADOS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS .....	40
<b>4.6.1. Análise biométrica, e biomassa vegetal e de grãos</b> .....	40
<b>4.6.2. Potencial hídrico e condutância estomática</b> .....	42
<b>4.6.3. Enzimas antioxidantes: superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX)</b> .....	43
<b>4.6.4. Análise do conteúdo nutricional</b> .....	44
<b>4.7. EFICIÊNCIA NO USO DA ÁGUA E ANÁLISE DOS INDICADORES DE EFICIÊNCIA ECONÔMICA</b> .....	45
4.7.1. PRODUTIVIDADE DA ÁGUA DA CULTURA (*WPC).....	45
4.7.2. PRODUTIVIDADE ECONÔMICA BRUTA DA ÁGUA DE IRRIGAÇÃO (*GEWPI)	45
4.7.3. ANÁLISE ECONÔMICA DO USO DE IRRIGAÇÃO.....	45
4.8. TRATAMENTOS DOS DADOS E ANÁLISE ESTATÍSTICAS.....	49
<b>5. RESULTADOS</b> .....	49
5.1. BIOMETRIA, BIOMASSA, RENDIMENTO DE GRÃOS, E FISIOLÓGICO.....	49

5.2. INTERAÇÃO DOS FERTILIZANTES APLICADOS E ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS.....	58
5.3. EFICIÊNCIA NO USO DA ÁGUA (INDICADORES ECONÔMICOS) E ANÁLISE FINANCEIRA.....	62
<b>6. DISCUSSÃO .....</b>	<b>70</b>
6.1. EFEITO DOS FERTILIZANTES NO CRESCIMENTO, BIOMASSA E PROCESSOS FISIOLÓGICOS, CONDUTÂNCIA E, COMPONENTES DE RENDIMENTO DE GRÃOS	70
6.2. ACÚMULO DE MACRO E MICRONUTRIENTES (EXPORTAÇÃO E EXTRAÇÃO)	73
6.3. EFICIÊNCIA NO USO DA ÁGUA.....	76
6.4. INDICADORES ECONÔMICOS .....	77
<b>7. CONCLUSÕES.....</b>	<b>79</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>80</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A cultura do feijão-caupi é extremamente importante para região Nordeste, por apresentar uma ampla variabilidade genética, boa adaptabilidade as condições edafoclimáticas (Galindo et al., 2020), e uma ótima oferta de proteínas (Aliyu et al., 2023), o que tem motivado o interesse crescente dos produtores nesta região, responsável por 720,2 mil toneladas de grãos, o que representa 23,53%, da total produção total de feijão no Brasil, distribuídas numa área de 1,2 milhões de hectares de (80% da área total) do país de acordo com (Conab, 2018).

O Brasil é um grande consumidor de fertilizantes minerais, ocupando a quarta posição mundial, com dependência internacional, na qual grande parte dos fertilizantes são obtidos da exportação. O consumo dos fertilizantes subiu de 32% em 1988 para 77% em 2018, no ano de 2019 estimou-se que as importações ultrapassaram US\$ 9 bilhões (Farias et al., 2021). Na região Nordeste, a utilização de fertilizantes ainda é uma prática bastante utilizada, por ser uma região composta por diversos solos, entre eles os arenosos, que é caracterizada por apresentar baixo teor de matéria orgânica, o que provoca a insuficiência de nitrogênios, e de outros minerais a depender da localidade. Essas condições combinadas com práticas de manejo inadequadas, comprometem diretamente a produtividade do feijão-caupi (Galindo et al., 2020; Marinho et al., 2017). Como estratégia para sanar essa deficiência, os agricultores recorrem ao uso de fertilizantes sintéticos que, quando utilizados de em excesso de forma contínua, pode afetar a estrutura do solo, e contaminar mananciais aquíferos, além do prejuízo econômico aos agricultores (Soumare et al., 2020).

Estudos têm sido realizados em busca de promover uma agricultura mais sustentável e econômica, que dispensem ou reduzam o uso dos fertilizantes nitrogenados, sendo a Fixação Biológica de Nitrogênio- FBN uma das alternativas. Em estudo realizado com a cultura do feijão-caupi por Freitas et al. (2015), têm se dedicado a sobretudo à estudar a diversidade e eficiência de rizóbios nativos de solos da região, capazes de nodular a acultura do feijão-caupi; a estabilidade da fixação biológica de nitrogênio de cultivares de feijão-caupi (Pereira et al., 2020b), a diversidade morfológica da população nativa de rizóbio do semiárido (Medeiros et

al., 2009), e a eficiência simbiótica e agronômica de novos rizóbios (Marinho et al., 2017), têm se mostrado promissoras.

Outra estratégia na redução dos fertilizantes químicos é o uso de nanopartículas de carbono, diversos autores têm desenvolvido estudos que apontam as principais nanotecnologias e sua eficiência nos mais diversos aspectos da agricultura, como aplicação de nanopartículas carbonáceas para o controle antifúngico (Nadeem et al., 2024), corretivos para o solo (Nepal et al., 2023), nanofibra de carbono como transportadora de nutrientes (Ashfaq et al., 2017). Nesta abordagem de nutrição de plantas, observou-se uma melhor absorção de potássio pelas raízes (Zhao et al., 2024), melhoria na altura e na massa seca da planta (Xin et al., 2022). Além disso, efeitos fitoestimulantes, melhorando o processo fotossintético, a utilização de água, o metabolismo do nitrogênio, a divisão celular e o alongamento para eventualmente aumentar seu crescimento (Lateef et al., 2024), também foram observados.

Considerando que a exploração do feijão-caupi na região de estudo é uma atividade que exige dos produtores adequado conhecimento sobre gestão do seu empreendimento, por tratar-se de um negócio que demanda um capital considerável para sua implantação e funcionamento, fazer uma caracterização minuciosa do custo de produção desse grão, bem como determinar a viabilidade econômica de sua exploração é crucial para implantação da cultura (Araújo, 2018).

Entretanto, há uma necessidade não atendida de estudar a estimativa de simbioses de diferentes cultivares de feijão-caupi × combinações de cepas bacterianas (Souza et al., 2021). E a realização de estudos de que promova a triagem e avaliação contínua de novas cepas de rizóbios, sendo necessário para selecionar associações simbióticas mais eficientes e adaptáveis, e que possibilitem aumentos de forma sustentável na produtividade de grãos (Souza et al., 2021).

Estudos embasam a eficiência do uso de nanopartículas carbonáceas atuando como mecanismo de absorção e acumulação de nutrientes, aumentando a eficiência do fertilizante no (feijão *Vigna radiata* (L.)) (Shekhawat et al., 2021a), melhorando o crescimento e a produtividade das plantas de feijão comum (*Phaseolus vulgaris* (L.)) (Salama et al., 2021). Contudo, ainda é escassa na literatura o estudo de biofertilizantes formulados a parti de

nanopartículas carbonáceas visando o incremento na produtividade do feijão-caupi em condições de clima semiárido.

Existe uma necessidade de reduzir o uso de fertilizantes convencionais inorgânicos (Marinho et al., 2017). Assim, a inoculação com bactérias fixadoras de nitrogênio, têm sido replicadas pelos produtores, principalmente devido às respostas benéficas em elevar a produtividade do feijão-caupi, reduzindo diretamente os custos na produção e elevando a renda. As bactérias conseguem fornecerem uma fonte de nitrogênio sustentável em substituição aos fertilizantes inorgânicos (Sousa et al., 2022).

Como estratégia de manejo para substituir os fertilizantes convencionais, a biotecnologia tem desenvolvido biofertilizantes contendo em sua formulação nanopartículas carbonáceas-NPCs, eficientes na transformação de materiais biodegradáveis (Nadeem et al., 2024). Estas nanopartículas podem aumentar a eficiência do uso dos nutrientes, considerando a liberação lenta e de forma eficiente, de acordo com a necessidade da planta (Wang et al., 2016). As nanopartículas se apresentam como inovações para melhorar a eficiência da produção agrícola com o mínimo impacto ambiental, pois são produzidas de diferentes composições, a base de carbono, minerais metálicas e de óxidos metálicos (Lowry et al., 2019).

## **2. OBJETIVO**

Objetiva-se com o presente estudo avaliar a influência de nanopartículas carbonáceas e avaliação contínua isolado rizobianos como possíveis inoculantes mais eficientes e adaptáveis, analisando o efeito de ambos como potenciais melhorias para a fertilização convencional de macro e micronutrientes, que possibilitem aumentar de forma sustentável a produtividade de grãos do feijão-caupi em condições de clima semiárido.

### **2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Investigar a influência das nanopartículas e de isolado rizobianos no acúmulo de macro e micro nutrientes nos tecidos vegetais.
- Avaliar parâmetros biométricos e resposta fisiológica (condutância estomática e sistema antioxidante) dos nanofertilizantes e da inoculação com rizóbios na cultura do feijão-caupi.

- Avaliar o comportamento dos fertilizantes submetido a diferentes lâminas de irrigação.
- Estimar a produtividade, viabilidade econômica do uso da água de irrigação e os indicadores de eficiência econômica do feijão-caupi submetido a diferentes biofertilizantes e a inoculação com rizóbios.

### **3. REVISÃO DE LITERATURA**

#### **3.1. IMPORTÂNCIA DO FEIJÃO-CAUPI**

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), é de origem africana e foi introduzido no Brasil por colonizadores no século XVI a partir do estado da Bahia. Comumente conhecido como caupi, feijão-macassar, feijão-fradinho, feijão-de-corda e etc. Apresenta sua maior predominância de cultivo nas regiões norte e nordeste, decorrente das condições climáticas quente e seco, de alta temperatura, alta umidade e alta semi-aridez, deve-se semear de setembro a fevereiro (Borém e Carbeiro, 2008; Filgueira, 1987; Filgueira, 2007).

A produção do feijão-caupi, é crescente, a sua comercialização tem sido direcionada para complementar o abastecimento do mercado nordestino do país, contudo, a cultura tem ganhado expressiva aceitação nos continentes asiático e africano, podendo destacar a Índia e o Egito, os principais importadores, proporcionando as exportações brasileiras (Conab, 2018).

É uma cultura de grande expressividade na região norte e nordeste, representa um importante potencial socioeconômica e nutricional (Silva et al., 2023). Apresentando uma área cultivada, de aproximadamente 1,2 milhão de hectares, sendo a maior produtora dessa espécie de feijão (Souza et al., 2022). Correspondendo por cerca de 80% da área cultivada no Brasil (Souza et al., 2021).

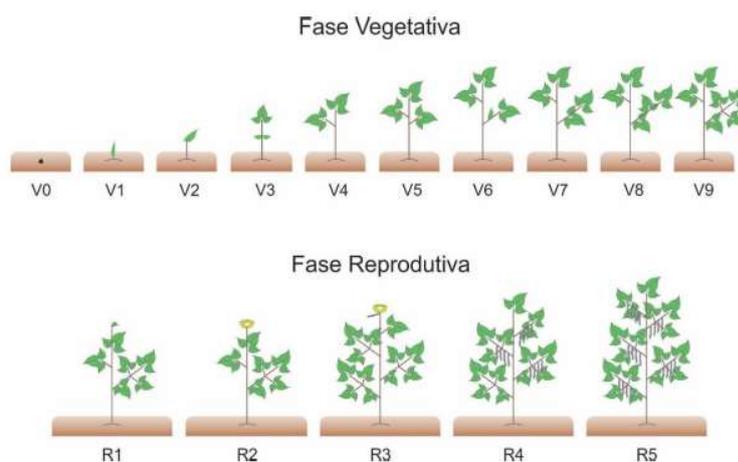
O feijão-caupi é caracterizado por apresentar porte determinado ou indeterminado, dependendo da cultivar, condicionando o tipo de condução. É formada por uma raiz principal, pivotante, com ramificações laterais, que pode atingir 2m de profundidade, razão da notável resistência à seca. Nas últimas décadas, inúmeras cultivares melhoradas têm sido desenvolvidas por pesquisadores atuando no Nordeste (Filgueira, 2007).

A cultura produz bem nos mais distintos tipos de solo, contudo, melhor se desenvolve em solos francamente arenosos ou areno-argilosos, com boa drenagem, apresenta tolerância à acidez, não exigindo a princípio a aplicação de calagem (Filgueira, 1987).

A colheita das vagens pode ser feita com ela ainda imatura, para obtenção do grão ainda verde, o “Feijão-verde” (termo nordestino), em estágio tenros, e coloração esverdeada ou creme claro a depender da variedade. A colheita também pode ser procedida no estágio de amadurecimento das vagens, obtendo grãos perfeitamente secos e duros (Filgueira, 1987; Filgueira, 2007).

Segundo Sousa, (2019) e Ribeiro; Rocha, (2000) os autores descrevem a cultura do feijão-caupi dividida em duas fases fenológicas.

**Figura 1.** Fase fenológica do feijão-caupi.



Fonte: SOUZA, 2019.

Fase Vegetativa:

V0 – Semeadura;

V1 – Os cotilédones encontram-se emergidos na superfície do solo;

V2 – As folhas unifoliadas encontram-se completamente abertas, suas duas margens estão completamente separadas;

V3 – A primeira folha trifoliada encontra-se com os folíolos separados e completamente

abertos;

V4 – A segunda folha trifoliada encontra-se com os folíolos separados e completamente abertos;

V5 – A terceira folha trifoliada encontra-se com os folíolos separados e completamente abertos;

V6 – Os primórdios do ramo secundário surgem nas axilas das folhas unifoliadas, podendo também ser observados nas axilas das primeiras folhas trifoliadas;

V7 – A primeira folha do ramo secundário encontra-se completamente aberta;

V8 – A segunda folha do ramo secundário encontra-se completamente aberta;

V9 – A terceira folha do ramo secundário encontra-se completamente aberta.

Fase reprodutiva:

R1 – Surgem os primórdios do primeiro botão floral no ramo principal;

R2 – Antese da primeira flor, geralmente oriunda do primeiro botão floral;

R3 – Início da maturidade da primeira vagem, geralmente oriunda da primeira flor. Esse estágio é caracterizado pelo início da mudança de coloração das vagens devido ao início da secagem das mesmas;

R4 – Maturidade de 50% das vagens;

R5 – Maturidade de 90% das vagens.

A presença do feijão-caupi na dieta dos brasileiros é advinda desde meados do século XVI. A produção da cultura do feijão-caupi apesar de muitos cultivos na região nordeste acontece em maior parte sob regime de subsistência, ainda assim, tem forte presença na geração de trabalho formal, está inserida na cadeia produtiva do setor da agricultura familiar, constituindo grandes empreendimentos agrícolas, percorrendo áreas de processamento, comercialização, e forte participação no comércio atacado e de varejo até o consumidor dos mais diversos dos centros urbanos (Freire Filho; Costa, 2020; Conab, 2018).

O feijão-caupi tem cada vez mais conseguido se adequar ao que o mercado exige, e a oferta de um produto padronizado, de alta qualidade, em quantidade e com regularidade vem despertando o interesse de agroindústrias de outras regiões do Brasil, e está contribuindo para

a abertura de novos mercados para a cultura. Com isso, também está havendo interesse de firmas de exportação pelo produto, já tendo sido feitas exportações para seis países, com muitos outros países interessados em importar feijão-caupi do Brasil (Freire Filho, 2011).

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, existe uma crescente demanda mundial voltada para o produto de alta qualidade do feijão-caupi, o acesso ao mercado internacional é um salto representativo, possibilitando difundir estratégias importantes para a produção e comercialização, tendo em vista as exigentes condições prevalentes no mercado internacional, em 2017 o Brasil exportou 122.597 t para diferentes países i. e., Estados Unidos, Reino Unido, Paraguai, Angola, Canadá, Egito, Japão, Portugal (Conab, 2018).

Além dos atributos de adaptação as condições edafoclimáticas, que torna a cultura do feijão-caupi muito importantes das regiões Norte e Nordeste do Brasil, onde é cultivado em regime de subsistência. Esta espécie é uma leguminosa importante, pois consegue se beneficiar do processo de fixação biológica de nitrogênio, o que leva a uma redução significativa nos custos de produção (Rufini et al., 2014).

A resposta da evolução de leguminosas sujeitas a solos com insuficiência de nitrogênio, pode estar relacionado com o processo de evolução dessas plantas a dependência da simbiose, promovendo as plantas a capacidade de ser noduladas, uma estratégia de melhor se adaptar aos diferentes estresses. Contudo, a domesticação, e as práticas agrícolas com o tempo, possa ter afetado a eficiência de nodulação no campo (Álvarez-Aragón et al., 2023).

Não existe uma obrigatoriedade dos rizóbios realizarem simbiose em leguminosas. O rizóbio é um organismo de vida livre presente no solo. As leguminosas emergem suas raízes sem pretensão de associação com rizóbios, e podem permanecer sem que ocorra essa associação durante do o ciclo de vida da planta (Epstein e Bloom, 2004).

O feijão-caupi é uma leguminosa, característica essa que permite à planta ser uma hospedeira capaz de ser facilmente noduladas por rizóbios presentes no solo. Essas leguminosas permitem associação com um grupo de rizóbios designado como “grupo miscelânea do feijão-caupi”, “rizóbio do feijão-caupi”, “rizóbio tropical”. Engloba principalmente estirpes de crescimento lento (*Bradyrhizobium* spp.), ressalta falar que foram encontradas estirpes de

crescimento rápido com a mesma capacidade de realizar simbiose em algumas leguminosas tropicais como o feijão-caupi (Freire Filho, 2011).

### **3.2. USO INDISCRIMINADO DOS FERTILIZANTES QUÍMICOS NA AGRICULTURA**

A demanda global por alimentos decorrente do aumento exponencial da população, tem intensificado o aumento do consumo e, dependência de produtos químicos na agricultura (Navarro & Morte, 2024). A intensificação agrícola de forma permanentes, provoca a extração dos nutrientes do solo o tornando cada vez mais pobre em nutrientes. Os produtores fertilizam o solo, e processam as atividades agrícolas para tornar o solo mais eficiente. Como alternativa de revitalização do solo, a prática de fertilização continua a ser sempre uma prioridade (Savci, 2012), de modo que os fertilizantes químicos se tornaram um componente-chave primordial para o sistema agrícola atender à demanda crescente, à produção agrícola e à qualidade nutricional (Goyal et al., 2023).

No Brasil, dados apontados pela Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos – SAE (2020), afirma que o Brasil é responsável por cerca de 8% do consumo global de fertilizantes, e que mais de 80% (oitenta por cento) dos fertilizantes consumidos no Brasil são de origem estrangeira, a colocando o país em quarto lugar do mundo, atrás apenas de China, Índia e Estados Unidos.

Ao mesmo tempo que os fertilizantes químicos são uma solução, por muitas vezes acabam por ser tornar uma problemática, ocasionada em sua maioria pela gestão inadequada da terra com dependência excessiva de fertilizantes químicos e agroquímicos para garantir custos de produtividade (Kuila & Ghosh, 2022). O número reduzido de empresas nacionais que detém a produção e, comercialização do produto ainda são bastantes controladas pelo mercado financeiro, e a discrepância se torna ainda maior devido a compra do fertilizante importado ser isenta de tributação, tornando a concorrência desleal em relação ao produto nacional, obrigando as empresas a elevar o custo dos produtos (Oliveira, 2019).

Uso excessivo distribuída da forma tradicional de fertilizantes, em que os fertilizantes são lançados manualmente na superfície da área de cultivo, um método que não consegue

controlar a taxa de frequência dos nutrientes, desencadeia uma fertilização ineficiente a depender do manejo (Rahman & Zhang, 2018). Contudo, o uso excessivo de fertilizantes químicos não só é caro, mas também cria o problema da poluição ambiental (Suhag, 2016).

A presença de metais pesados danifica fontes de água (Zambrano-Mendoza et al., 2021). Aumenta os custos de produção em cerca de 33% e os gases de efeito estufa em 60% (Rahman & Zhang, 2018). A utilização de fertilizantes nitrogenados, no processo de conversão do nitrato através nitrificação por microrganismos, contudo, devido à carga negativa do nitrato pode atingir as águas subterrâneas no solo (Savci, 2012).

Os fertilizantes afetam negativamente o solo em termos de esgotamento da capacidade de retenção de água, quando usado exageradamente promovem aumento da salinidade e disparidade nos nutrientes do solo (Mahanty et al., 2017). Ocasiona uma fraca atividade microbiana no sistema de cultivo, alteração no pH do solo, aumentar pragas, acidificação e crosta do solo, o que resulta na diminuição da carga de matéria orgânica (Pahalvi et al., 2021). Além do solo existe um elevado risco de contaminação dos alimentos nas culturas de ciclo curto, como os legumes e o milho, as culturas de raízes, como a cenoura, e os tubérculos, como o inhame e a mandioca (Tayoh, 2020).

Diante da demanda populacional, reduzir a intensificação agrícola não sanaria à problemática, no entanto, é possível o desenvolvimento de práticas ambientalmente corretas, que promova a redução do uso de fertilizantes inorgânicos e, permita o aumentamos o uso de fertilizantes orgânicos e biofertilizantes (Navarro & Morte, 2024). A agricultura sustentável oferece o potencial para satisfazer as necessidades agrícolas, uma vez que abrange avanços na agricultura, utilizando agricultura, práticas de gestão e tecnologia especiais, garantindo ao mesmo tempo que nenhum dano seja causado à mesma (Suhag, 2016).

Consequentemente, estratégias de intensificação para aumentar a produtividade das culturas e, ao mesmo tempo, proteger o meio ambiente tornaram-se essenciais para alcançar o crescimento agrícola, as necessidades alimentares e a segurança nutricional (Abebe et al., 2022).

A gestão da saúde do solo é algo que deve ser abordado devido ser vital para a manutenção constante da biodiversidade e da eficiência da produção agrícola sustentável. Portanto, buscar preservar a saúde do solo é de primordial importância para a sustentabilidade do ecossistema (Pahalvi et al., 2021). Para um crescimento e produtividade bem sucedidos das culturas, os produtores precisam de manter a fertilidade do solo e conservar a humidade (Mogale et al., 2023).

### 3.3. RIZÓBIOS

Em 1893, foi descoberta a primeira bactéria fixadora de N<sub>2</sub> atmosférico, denominada de diazotrófica, o que naquele momento gerou um forte impacto, conseqüentemente um maior interesse e uma vasta literatura sobre o assunto, sendo os Rizóbios os mais estudados, e, reconhecidas pela sua capacidade de formar nódulos principalmente em leguminosas (Fernandes, 2006). Comumente, são encontrados como microrganismos livres no solo, como endófitos comensais em plantas ou associados a leguminosas, formando nódulos simbióticos de fixação de nitrogênio (Álvarez-Aragón et al., 2023).

Pertence ao filo Proteobacteria e a classe  $\gamma$ - proteobacteria, os *Rhizobium* apresentam nódulos, que pode ser comparado podendo a estrutura de uma casa desses microrganismos endofíticos fixadores de N<sub>2</sub> (Rana et al., 2023). Genericamente chamada de Rizóbios, são definidas as bactérias com capacidade diazotróficas, pertencentes à família *Rhizobiaceae*. A taxonomia polifásica afirma que esse grupo de espécies de bactérias precisa ser agrupado em quatro famílias distintas (Freire Filho, 2011).

Diversos gêneros e espécies são capazes de realizar a Fixação Biológica de Nitrogênio, entretanto, podendo a fixação variar em especificidade, estrutura, localização e o microrganismo responsável. Dentro do conjunto de bactérias que realizam a FBN estão as denominadas simbióticas, que são caracterizadas pela capacidade de formar nódulos, pertencentes ao grupo rizóbio e do gênero *Frankia*. Estas bactérias diazotróficas estão posicionadas na subdivisão Alfa de Proteobacteria, subgrupo esse mais estudado, estando incluído dentro do grupo as bactérias simbióticas do gênero *Azorhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Rhizobium* e *Sinorhizobium*, (Fernandes, 2006; Epstein e Bloom, 2004).

É no interior dos nódulos onde o rizóbio passa pelas modificações morfofisiológicas, e transforma-se em bacteroides, permitindo ter a capacidade de reduzir o nitrogênio atmosférico (N<sub>2</sub>) em amônia (NH<sub>3</sub>), que é a forma que a planta assimila. Processo esse denominado de Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) (Freire Filho, 2011; Vieira et al., 2010).

### **3.3.1. Fixação biológica de nitrogênio e sua importância econômica**

Em 1888, publicou-se o primeiro material descrevendo a capacidade de as bactérias fixarem nitrogênio N<sub>2</sub> atmosférico, e o mesmo ser absorvido pelas plantas. A incorporação de N<sub>2</sub> através da FBN se tornou uma via diferente ao ecossistema do planeta, possibilitou uma economia substancial de energia fóssil, o que anteriormente era empregada pelas indústrias na produção de fertilizantes nitrogenados que são utilizados com o intuito de atender a grande demanda da agricultura mundial (Fernandes, 2006).

O N<sub>2</sub> representa uma grande parcela do reservatório de (aproximadamente 78%) que compõem a atmosfera, contudo, não estando acessível de forma nutricional. Os animais vegetais e a maioria dos microrganismos dependem de forma direta, de uma pequena parcela de N na forma combinável. Apenas uma pequena parcela das espécies procariotas denominados de fixadoras de nitrogênios ou diazotróficos, possui a enzima nitrogenase, a qual permite reduzir o N<sub>2</sub> para a forma inorgânica combinada NH<sub>3</sub>, tornando disponível para ser absorvido pelas plantas e outros organismos (Moreira; Siqueira, 2006).

Considerada a forma de fixação limpa, e bastante importante pela capacidade de redução de bilhões de toneladas de fertilizantes nitrogenados a FBN, é realizada por grupo seletivo de procariotas – como bactérias diazotróficas – que sintetizam a nitrogenase e atribuem a função de reduzir o (N<sub>2</sub>) atmosféricos à NH<sub>3</sub>, sob temperaturas e pressões subambientais (Vegara e Araujo, 2021).

De acordo com Fernandes (2006), a fixação biológica de N<sub>2</sub> a partir de microrganismos procarióticos pode ser considerado um dos mais importantes marcos dos processos da natureza já realizados.

Os *Rhizobium* assim como outras bactérias carregam alguns genes, que permite realizar funções específicas característica do microrganismo. Estão presentes nos rizóbios os genes de plasmídeo para nodulação (*nod*, *nol* e *noe*) em estreita proximidade com os genes *nif* e *fix*. Esse gene permite que o rizóbio secreta os oligossacarídeos de lipoquitina podendo atuar como um fator de nodulação responsável por manter a forte associação simbiótica dos rizóbios com as leguminosas (Rana et al., 2023).

O processo de conversão consiste na ação em que a nitrogenase reduz  $N_2$  a  $NH_3$ , à custa de oito elétrons ( $e^-$ ), e oito prótons ( $H^+$ ) e 16 moles de ATP, e, possibilitando, a  $NH_3$  ganha mais um  $H^+$  na célula vegetal e se torna  $NH_4^+$ , o processo que mediam a Fixação Biológica de Nitrogênio é ( $NH_4^+ : N_2 + 8e^- + 8H^+ + 16 ATP^- \xrightarrow{\text{Nitrogenase}} 2NH_3 + H_2 + 16 ADP + 16 Pi$ ). Portanto, a planta hospedeira de forma involuntária abriga, em seus nódulos a bactéria diazotrófica e a cultiva com carbono e outros nutrientes, de tal modo que o hospedeiro, por sua vez, fixando o  $N_2$ , e transferindo o  $NH_4^+$  diretamente para a planta, contribuindo com a redução das perdas (por volatilização de amônia e por lixiviação) que poderia ocorrer (Vegara e Araujo, 2021; Fernandes, 2006 ; Moreira E Siqueira, 2006; Epstein E Bloom, 2004).

A fabricação de fertilizantes nitrogenados através do setor industrial, depende fortemente de combustíveis fósseis, o que requer um grande fornecimento de energia, para a síntese de compostos nitrogenados a partir do gás  $N_2$  e sua reação com o hidrogênio, acarretando em um grande custo para produção, transporte, armazenamento e aplicação de N fertilizante (Bohloul et al., 1992).

O grande gargalo da fixação biológica de nitrogênio, é o seu potencial econômico, com destaque para o cultivo de soja (*Glycine max L*) no Brasil, que tem respondido satisfatoriamente, alcançando lucros na adoção de inoculantes, gerando uma economia de 15,2 bilhões de dólares, considerando 4% do PIB (Produto Interno Bruto) gerado pelo agronegócio no Brasil nos anos de 2019- 2020 (Telles et al., 2023).

A contribuição da fixação biológica para a cultura da soja é destaque no Brasil e reconhecida internacionalmente, pelo seu baixo custo para o produtor, quando considerada a exigência nutricional requerida pela cultura, resultando em uma economia de US\$ 3 bilhões por

safra. nos últimos anos, estima-se que o país alcança uma economia entre 80% e 95%, diferentemente dos Estados Unidos, onde esses valores raramente excedem 50% (Cunha e Campo, 2006).

Inoculantes formulados a partir de bactérias fixadoras de nitrogênio, tem permitido resultados significativos na soja, em converter o nitrogênio gasoso ( $N_2$ ) da atmosfera em compostos nitrogenados, em quantidades de até 300 kg de N  $ha^{-1}$ , que serão utilizados pela planta, permitindo a substituição de fertilizantes nitrogenados industriais pela inoculação da soja com bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, essa é uma tecnologia extremamente simples e que não polui o meio ambiente (Embrapa, 2020).

A fixação biológica de nitrogênio através da simbiose realizada nas raízes das plantas leguminosas, oferece uma eficiência de fixação de N entre 20-300 Kg  $há^{-1}$ .  $ano^{-1}$  (Soumare et al., 2020). Tratando-se de produtividade, para obter cerca de 3.500 kg. $ha^{-1}$  de grãos de soja, requer 280 kg. $ha^{-1}$  de N, podendo ser fornecida de forma satisfatória pela fixação biológica de nitrogênio (FBN) (Pinto et al., 2023).

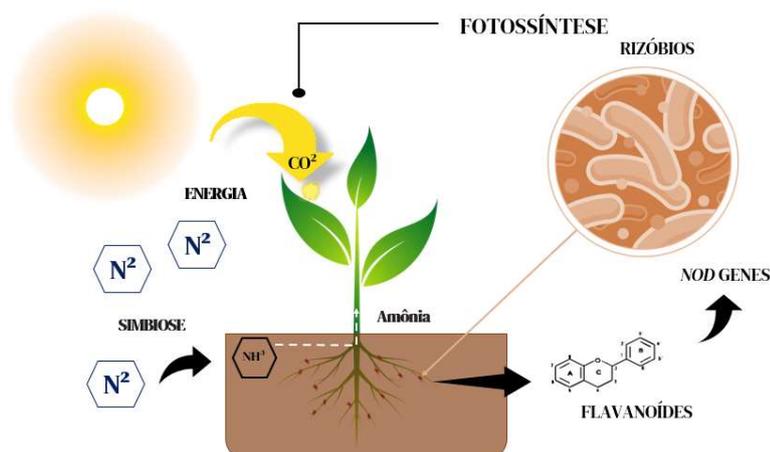
A FBN contribui com ganhos inegáveis para a economia monetária, responsável pela substituição dos fertilizantes químicos pelos inoculantes, estima-se uma economia anual que supera a margem de US\$ 13 bilhões, contribuindo com a redução de gases de efeito estufa, considerando que agricultura proporciona a emissão de mais de 10kg de gases de efeito estufa de  $CO_2$ , ao comparar essa emissão com a FBN essas emissões se tornam desprezíveis (Auras et al., 2018).

Elencando a importância da FBN para uma escala global, os valores simbióticos e medidos de vida livre disponíveis, obtidos de ecossistemas naturais, por cobertura da terra, apresentam resultados expressivos ao que tange a ecologia do planeta, autores estimaram o valor global médio de 88 Totais globais (Tg)  $N$   $ano^{-1}$  (52-130 Tg  $N$   $ano^{-1}$ ) para FBN em ecossistemas terrestres naturais (Davies-Barnard e Friedlingstein, 2020).

Estudos desenvolvidos a partir do uso da modelagem estimou durante o período de 1981-2016, que a fixação biológica global de N em leguminosas de grão (ou seja, soja e todas as leguminosas) foi de  $17,2 \pm 2,9$  Tg  $N$   $ano^{-1}$  considera-se que a maior taxa de fixação ocorreu em

regiões tropicais e temperadas com clima quente e clima úmido. Os valores de Tg juntamente com estudos a parti da modelagem pode ajudar a prever e detectar a contribuição potencial das plantas fixadoras de N como “adubo verde” para reduzir ou eliminar o uso de fertilizantes N (Ma et al., 2022).

**Figura 2.** Modelo resumido para fixação simbiótica de nitrogênio em leguminosas por rizóbios.



**Fonte:** Autor, 2023. Adaptado de Lindstrom e Mousavi, *Microbial Biotechnology* (2020).

### 3.4. Biofertilizantes e nanopartículas na agricultura

A lenta biodegradação dos produtos agroquímicos, ocasionando o acúmulo subterrâneo com alterações diretamente na estrutura do solo, interferindo na fertilidade e capacidade de retenção de água, somado as aplicações excessivas de fertilizantes sintéticos, provocando à eutrofização dos recursos hídricos, efeito estufa e acúmulo de tóxicos advindo de metais pesados, (Maçik et al., 2020), lixiviação de nutrientes, degradação do solo e poluição ambiente(Zulkarnain, 2023). Se tornando uma ameaça à natureza decorrente da poluição do ar, da água e do solo(Mahanty et al., 2017).

A agricultura biológica através do uso de biofertilizantes torna-se mais uma alternativa de reduzir a dependência de insumos artificiais na produção agrícola, combinada com práticas agrônômicas que permitam a manutenção da biodiversidade dos solos, com soluções que

eficientes que protejam a saúde humana e o meio ambiente.(Maçik et al., 2020) Assim, os biofertilizantes são considerados uma alternativa segura de insumos químicos(Mahanty et al., 2017). Contribuindo para o desenvolvimento de países subdesenvolvidos, garantindo o interesse de tecnologias que aumento a produção agrícola em todo o mundo (Zambrano-Mendoza et al., 2021)

Os biofertilizantes destacam-se na agricultura, e são amplamente aceitos pela eficiência de otimizar processos da atividade indígenas do solo e otimizar a atividade microbiana (Mahanty et al., 2017). Promovendo melhor estado de crescimento, e no desenvolvimento das plantas através do aumento da biodisponibilidade de nutrientes nativos (N, P, K, S Zn) (Maçik et al., 2020), atuam como componentes importantes do manejo integrado de nutrientes(Htwe et al., 2019). Liberta estimulantes de crescimento de plantas, aumentando a tolerância das plantas de estresse abióticos e bióticos (Mahanty et al., 2017).

Além de ser uma alternativa ecologicamente renovável de nutrientes para as plantas, os biofertilizantes tem alcançado aceitação e popularidade, ocupando uma posição importante em escala mundial na produção agrícola (MAÇIK; GRYTA; FRĄC, 2020). Pontuando positivamente, oferecem uma boa relação custo-benefício, respeito ao meio ambiente e fácil produção no nível agrícola (Navarro e Morte, 2024).

Os biofertilizantes são uma opção econômica para o fornecimento de nutrientes, atuando como excelentes fontes de microprodutos químicos e micronutrientes. Além disso, eles contribuem com matéria orgânica, promovem a secreção de hormônios de crescimento e ajudam a neutralizar os impactos negativos dos fertilizantes químicos (Mahanty et al., 2017). Dessa forma, os biofertilizantes oferecem inúmeros benefícios, como o aumento do rendimento das colheitas, a melhoria da qualidade dos frutos, a fixação de nitrogênio e a solubilização de fósforo. Eles também aprimoram a vitalidade e as propriedades do solo, promovendo a conservação e melhoria dos recursos naturais (Navarro e Morte, 2024), e na produção de fitohormônios (bioestimulantes) (Htwe et al., 2019).

O desenvolvimento de biofertilizantes utilizados como alternativa para incrementar a produtividade do feijão-caupi tem sido base de estudos, do qual biofertilizantes produzido a

partir de cepas de *Bradyrhizobium* com *S. griseoflavus* foi eficaz em feijão-caupi independente da aplicação de nitrogênio, promovendo o aumento no crescimento de plantas e na nodulação de nitrogênio, e absorção de NPK (Htwe et al., 2019). Biofertilizantes a partir de bactérias bactéria *Enterobacter cloaca* trouxeram resultados significativos na altura da planta, massa seca da parte aérea e rendimento de vagens do feijão-caupi (Abd e Alkurtany, 2023).

As plantas têm sua produtividade afetada diretamente quando sujeitas a fatores críticos, como potencial genético, estresse biótico, abiótico e nutricional (Pandey et al., 2018). Somados ao uso excessivo dos fertilizantes e seu alto preço, desencadeiam problemas ambientais e econômicos (Fatima et al., 2021). As nanopartículas de carbono (NPC's) foram propostas que poderia potencialmente melhorar a fertilidade do solo e melhorar o crescimento das culturas e os processos fisiológico e demonstraram o potencial para fornecer nutrientes de forma eficaz através de raízes, folhas e revestimentos de sementes (Lowry et al., 2019).

As nanopartículas são caracterizadas por apresentar partículas minúsculas com diâmetros entre 45,8 a 68 nm, o tamanho reduzido permite uma grande relação superfície-volume, tornando mais adequado a prática agrícola com elevada eficiência no aumento da germinação das sementes, altura da parte aérea, comprimento da raiz e peso de plantas como grama vermelha, feno-grego e milho. As nanopartículas influenciam de forma eficiente no crescimento, produção e nos processos fisiológicos das plantas (Harikrishnan et al., 2024; Lateef et al., 2024).

O uso de nanopartículas no tratamento reduz os efeitos do estresse térmico, ampliando a capacidade de hidratação, aumentando o teor de clorofila e melhorando a regulação da abertura estomática. Além disso, sob condições de estresse pelo frio, as nanopartículas melhoram o vazamento de eletrólitos, a atividade fotossintética e reduzem os danos à membrana (Goyal et al., 2023). A síntese verde, também conhecida como "fitonanotecnologia", é uma técnica empregada na produção de nanopartículas (NP), proporcionando benefícios como biocompatibilidade, escalabilidade e aplicabilidade, devido ao uso de água como meio de redução (Shah et al., 2023)

A utilização de nanopartículas com superfícies carbonáceas porosas, provenientes de resíduos agrícolas, está se tornando cada vez mais comum. O processamento de biomassas residuais para produzir materiais carbonáceos em nanopartículas de carbono ativado está ganhando destaque e recebendo considerável atenção no campo da nanociência e da engenharia de águas residuais (Oyekanmi et al., 2022).

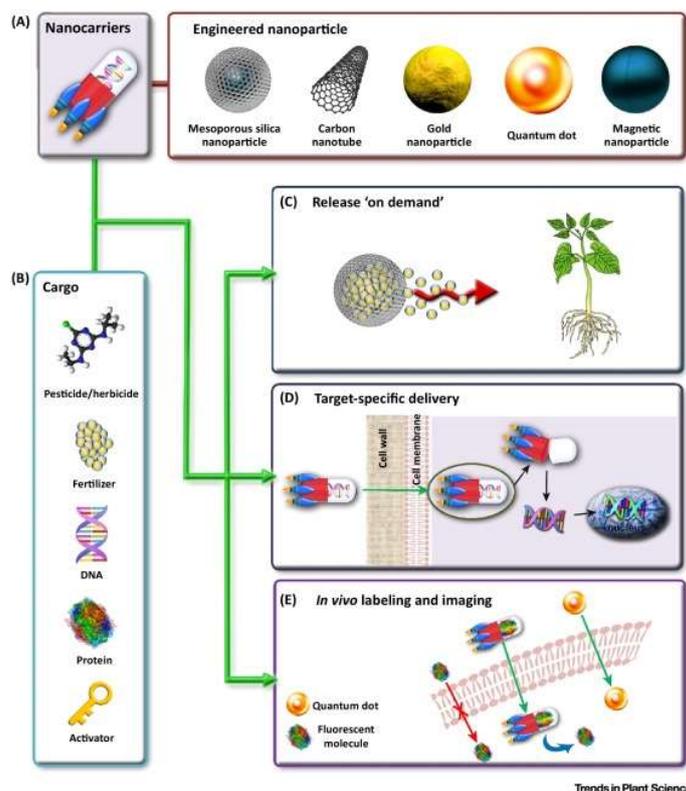
As nanopartículas carbonáceas derivadas do biochar têm sido empregadas para reduzir a quantidade de fertilizante comercial necessária para o crescimento das plantas. Isso, por sua vez, pode ajudar a mitigar os efeitos prejudiciais da contaminação do solo sobre os seres humanos, os animais e o meio ambiente (Salama et al., 2021).

As nanopartículas influenciam em atividades biológicas nas plantas, como o crescimento, produção, saúde e outros processos fisiológicos das plantas. As propriedades físico-químicas das nanopartículas, principalmente a grande relação superfície-volume e as composições químicas, tornam-nas muito adequadas para práticas agrícolas. (Lateef et al., 2024). As nanopartículas na forma de fertilizantes permitem uma melhor eficiência do uso dos nutrientes, decorrente da liberação em dosagens de acordo com a necessidade da planta (Wang et al., 2016).

Os efeitos fitoestimulantes das nanopartículas são atribuídos por sua capacidade de penetrar, transcolar, facilitar a troca de elétrons e desenvolver interações favoráveis com plantas vegetais que melhoram o processo fotossintético, a utilização de água, o metabolismo do nitrogênio, a germinação de sementes, a divisão celular e o alongamento para eventualmente aumentar seu crescimento (Lateef et al., 2024).

As plantas estão constantemente sujeitas aos estresses abióticos com a seca, sal, metais pesados, temperaturas extremamente baixas ou altas e outros extremos ambientais são algumas das tensões potenciais que constituem grandes problemas globais. Nas mudanças climáticas globais, as plantas são mais suscetíveis ao estresse abiótico (Bashir et al., 2021).

**Figura 3.** Representação Esquemática das Aplicações da Nanotecnologia nas Ciências Vegetais. (A) Nanopartículas de engenharia utilizadas como nanocarreadores para entrega de diversas cargas exógenas (B), incluindo agroquímicos e moléculas bioativas. (C) Liberação de agroquímicos mediada por nanocarreadores de maneira controlada. (D) Entrega mediada por nanocarreadores de moléculas bioativas em células vegetais. (E) Entrega de agentes fluorescentes intracelulares mediados por nanocarreadores (por exemplo, pontos quânticos ou proteínas fluorescentes) para marcação e imagem intracelular.



**Fonte:** (Wang et al., 2016).

Estes estresses acabam por reduzir o potencial produtivo das culturas, a seca afeta e o estresse salino, afeta o crescimento das plantas e o acúmulo de biomassa ao inibir a expansão foliar e estomática, levando a taxas fotossintéticas mais baixas, desta forma ocasiona a redução no crescimento das plantas que é controlada por uma série de processos, como estado hidráulico da planta, fitohormônios, ajuste osmótico e sinalização ROS (Ali et al., 2017).

Portanto, as NPs têm demonstrado eficiência, permitindo que as plantas se ajustem a condições estressantes de forma mais eficaz e produzam mais rendimentos, reduzindo os efeitos

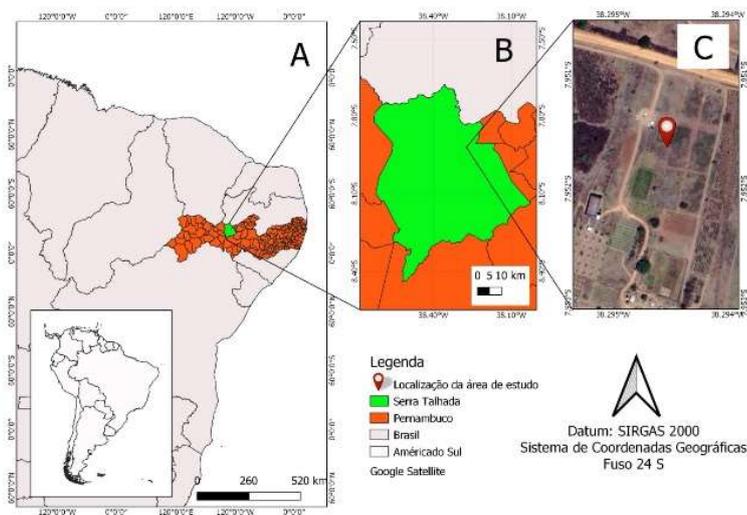
tóxicos do estresse abiótico e influenciando vários atributos morfológicos, anatômicos, fisiológicos, bioquímicos e moleculares das plantas (Bashir et al., 2021).

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. ÁREA DE ESTUDO

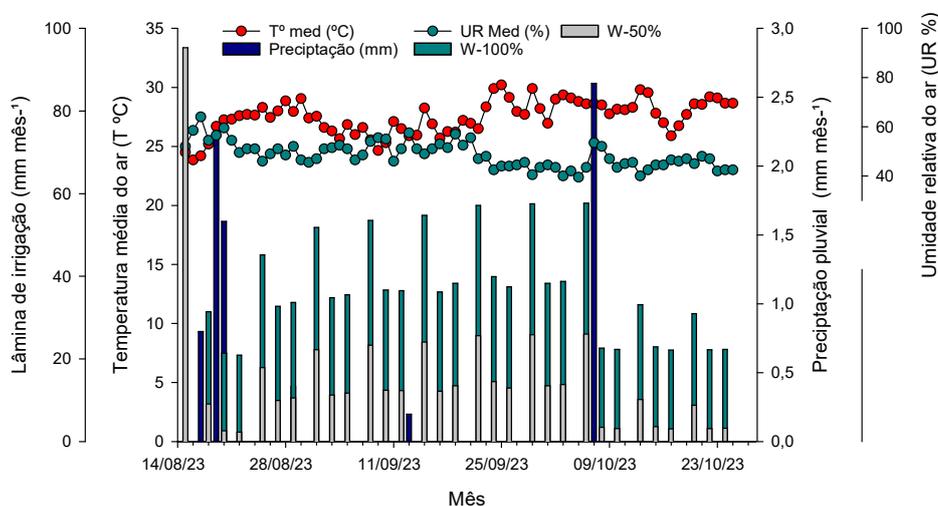
O experimento foi conduzido no período de agosto a outubro de 2023 na área experimental da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UAST), em Serra Talhada, Pernambuco, Brasil, localizado na latitude 7° 59' 7" Sul, longitude 38° 17' 34" Oeste e 490 m de altitude.

**Figura 4.** Mapas da América do Sul, do Brasil e do Estado Pernambuco (A), da cidade de Serra Talhada-PE (B) e localização da área onde foi realizado o estudo (C). Área de implantação do experimento (D) (E).



Fonte: Autor, 2024.

**Figura 5.** Condições ambientais e lâminas de disponibilidade hídricas via irrigação plena irrigação e déficit hídrico, em cultivo de feijão-caupi, no município de Serra Talhada -PE, Brasil.



O clima do município de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo BSw<sup>h</sup> semiárido, com verões chuvosos e invernos secos (Alvares et al., 2013). A precipitação média anual é de 642,1 mm, ocorrendo em sua maioria (85%) entre dezembro e maio, temperatura média anual igual a 24,8°C e umidade relativa de 62,5% (Silva et al. 2015; Alcântara et al. 2021). Durante a condução do estudo, houve baixa precipitação pluviométrica (3 mm), a temperatura média entre 24,5 a 30 °C e, umidade relativa do ar de variando entre 40 a 68,5 %. As lâminas foram definidas como plena irrigação com 100% da ETC, e com deficit hídrico de 50% da ETC (**Fig. 2**).

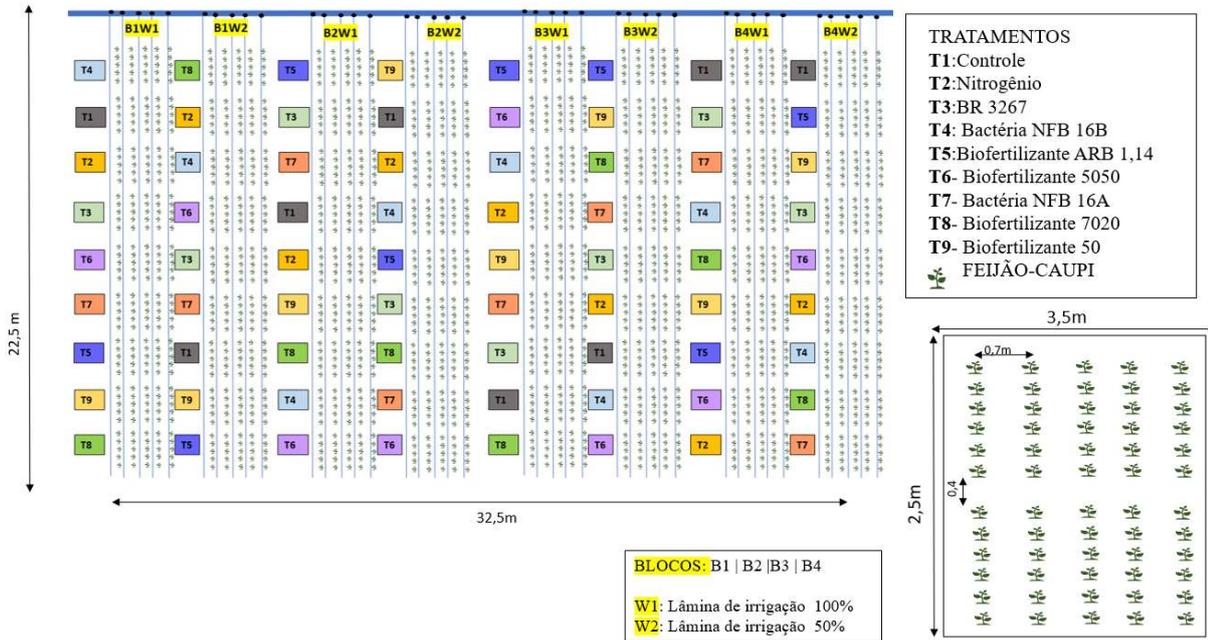
#### 4.2. DESING E TRATAMENTOS EXPERIMENTAIS

O delineamento utilizado foi em blocos inteiramente ao acaso disposto em esquema de parcelas subdivididas. Os tratamentos consistiram (9 X 2) de nove aplicações nomeados de fertilizantes contendo três tipos de isolados rizobianos (BR 3267, NFB 16A e NFB 16B), quatro tipos de biofertilizantes (ARB 1,14, BIO 5050, BIO 7020, BIO 50) e o adubo químico

(nitrogênio) e o controle, aplicado em duas lâminas de irrigação sendo uma plena irrigação (W-100% da ETc) e déficit hídrico (W-50% da ETc). Desta forma T1: Controle-plena irrigação; T2: Adubo químico (N)- plena irrigação; T3: Inoculante recomendado para feijão-caupi BR 3267-plena irrigação; T4: Bactéria rizobiana nativa NFB 16B- plena irrigação; T5: Biofertilizante ARB 1,14- plena irrigação; T6: Biofertilizante 5050- plena irrigação; T7: Bactéria rizobiana nativa NFB 16A- plena irrigação; T8: Biofertilizante 7020- plena irrigação; Biofertilizante 50- plena irrigação; T9- Controle-déficit hídrico; T10- Adubo químico (N)-déficit hídrico; T11: Inoculante recomendado BR 3267- déficit hídrico; T12: Bactéria rizobiana nativa NFB 16B- déficit hídrico; T13: Biofertilizante ARB 1,14- déficit hídrico; T14: Biofertilizante 5050- déficit hídrico; T15: Bactéria rizobiana nativa NFB 16A- déficit hídrico; T17: Biofertilizante 7020- déficit hídrico; T18: Biofertilizante 50- déficit hídrico.

As lâminas de irrigação foram as parcelas, e os fertilizantes as sub parcelas com 4 repetições, totalizando 18 tratamentos e 72 parcelas experimentais. Foi utilizado a cultura do feijão-caupi variedade IPA 206, disponibilizada pelo banco de germoplasma do Instituto de Pesquisa Agrônomo -IPA. A semeadura foi realizada no dia 16.08.2023, com 5cm de profundidade, com três sementes por cova, depois de 15 dias foi realizado o desbaste deixando 25 plantas por parcela. O espaçamento consiste em 70 cm entre fileiras e 50 cm entre plantas. Cada parcela com 5 fileiras, sendo as fileiras da periferia consideradas bordadura, e as três filas centrais para a realização das avaliações.

Figura 6. Croqui do delineamento da área experimental.



Fonte: Auto, 2024.

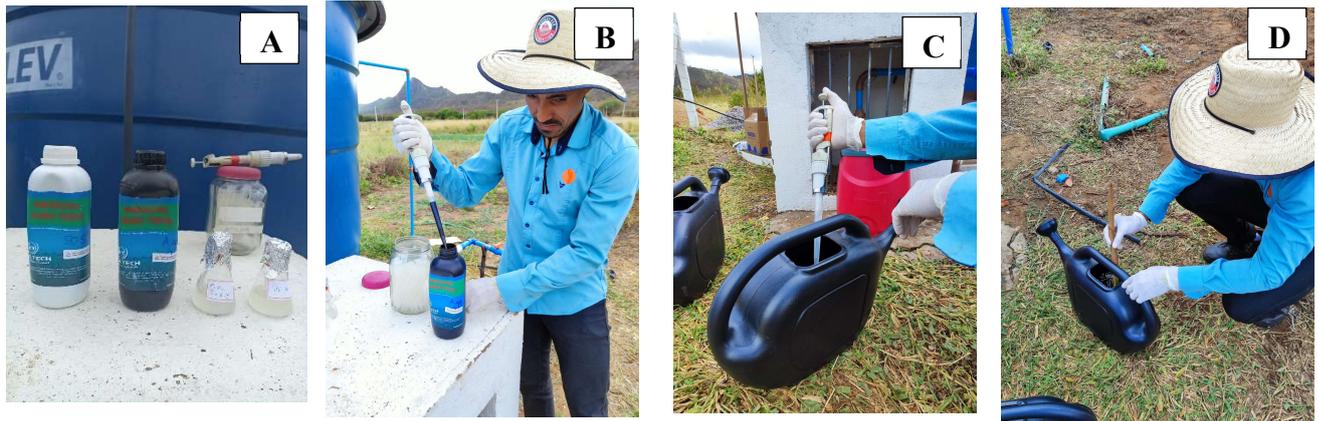
### 4.3. PROCEDIMENTOS DE CONDUÇÃO EXPERIMENTAL

A área foi preparada com a realização de uma roçagem mecânica, e os restos culturais foram incorporados no solo. Capinas manuais foram realizadas sempre que necessárias para eliminar as plantas daninhas que surgiam na área. Para o controle de formiga (*Atta*) foi realizado a partir do uso do formicida ISCANILL jardinagem amadora, e para o controle de pulgão foi utilizado o Lannate® BR inseticida registrado para a cultura, do pré-plantio até o fim do ciclo sendo aplicado via pulverizados costal.

A dose aplicação dos fertilizantes (bactérias e biofertilizantes) foi de 10ml, diluído, os fertilizantes foram retirados dos recipientes, sendo trocado o bico da pipeta de acordo com cada bactéria ou biofertilizante, para evitar misturar e contaminação por resíduos. O qual foi adicionado em um regador manual de forma individual identificado para cada fertilizante, contendo o volume de 10L de água, em seguida foi aplicado de forma única e individual nas parcelas referente. O nitrogênio foi aplicado na forma de ureia, seguindo a recomendação da

adubação para a cultura pela EMBRPA 80kg.ha<sup>-1</sup>, sendo aplicado em covas ao lado do feijão-caupi. Após 15 dias, o mesmo procedimento foi realizado apenas para a aplicação dos biofertilizantes, com aplicação das doses dos biofertilizantes na concentração de 10ml diluído em 10L de água.

**Figura 7.** Biofertilizantes e inoculantes rizobianos (A); coletando biofertilizante (B); Aplicação em regador de 10L (C); Homogeneização (D).



Fonte: Autor, 2024.

**Figura 8.** Instalação do sistema de irrigação (A); Semeadura (B); Aplicação dos produtos (C).



Fonte: Autor, 2024.

#### 4.4. IRRIGAÇÃO

O suprimento de água para a necessidade hídrica da cultura foi realizado a cada dois dias, utilizando um sistema por gotejamento, de acordo com a evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>), respeitando-se a demanda para cada fase fenológica da cultura por meio do coeficiente da cultura (K<sub>c</sub>); e as condições do ambiente por meio da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>). A água aplicada foi proveniente de um poço artesiano, sendo classificada como C3S1 caracterizada por uma alta salinidade e baixa sodicidade Richards (1954). Caracterização dos atributos químicos da qualidade da água, apresenta os seguintes atributos pH:6,63; CE 1,68 (dS m<sup>-1</sup>); Cálcio 5,83(mmoL/L<sup>-1</sup>); magnésio 6,37 (mmoL/L<sup>-1</sup>); potássio 0,305 (mmoL/L<sup>-1</sup>); sódio 2,04 (mmoL/L<sup>-1</sup>); cloreto 11,69 (mmoL/L<sup>-1</sup>); RAS 0,94(mmoL/L<sup>-1</sup>).

Para o cálculo da lâmina de água aplicada, foi utilizado o seguinte modelo matemático:

$$ET_c = ET_o \times K_c;$$

Em que, ET<sub>c</sub>: Evapotranspiração da cultura (mm/dia); ET<sub>o</sub>: Evapotranspiração de referência (mm dia<sup>-1</sup>); K<sub>c</sub>: coeficiente da cultura (adimensional). A ET<sub>o</sub> foi estimada pelo método de Penman-Monteith parametrizado pelo boletim da FAO 56 (Allen et al., 1998), sendo os, obtidos de uma estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada na área experimental da Unidade Acadêmica de Serra Talhada-PE, Brasil.

#### 4.5. COLETA PARA CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Uma coleta de solo foi realizada antes de implantação do experimento, as amostras foram coletadas na profundidade de 0-20 cm, e colocadas em sacos plásticos identificados, logo após foram secas em local protegido em temperatura ambiente (TFSA), destorroadas, homogeneizadas e peneiradas (peneira com malha de 2 mm). Subamostras foram coletadas para determinação de atributos químicos e da granulometria dos solos. As análises físico-químicas foram realizadas seguindo metodologias estabelecidas pela Embrapa (Sobral et al., 2015). O solo foi classificado como Haplustox Eutroférico Típico (Henrique et al., 2024).

As frações granulométricas de (Areia, Silte e argila), e os atributos físicos determinados: Densidade do solo (D<sub>s</sub>) pelo (método do torrão); Densidade da partícula real (D<sub>p</sub>); Argila

dispersa em água (ADA); porosidade total (Pt); Grau de dispersão (Gdis); Grau de floculação (Gflo); as análises foram realizadas seguindo metodologias estabelecidas por Embrapa (Teixeira et al., 2017). Os atributos químicos: condutividade elétrica (CE) (determinada após preparo da pasta de saturação); pH em água (proporção solo:água de 1:2,5); sódio ( $\text{Na}^+$ ), potássio ( $\text{K}^+$ ), fósforo (P) (extraídos com Mehlich-1 e dosados por fotometria de emissão de chama ( $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ ) e colorimetria (P); cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) (extraídos com KCl 1 mol L<sup>-1</sup> e dosados por titulometria); acidez potencial (H+Al) (extraída com acetato de cálcio 0,5 mol L<sup>-1</sup> e dosada por titulometria).

**Tabela 2.** Caracterização dos atributos físico-químico do solo.

ATRIBUTOS QUÍMICOS											
M.Org	P-Resina	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	S (bases)	Al <sup>3+</sup>	H+Al+	T	m	V
(g/dm <sup>3</sup> )	(mg/dm <sup>3</sup> )					(cmolc/dm <sup>3</sup> )				%	
11,1	68,6	3,47	2,1	0,62	0,05	6,24	0	0,18	6,24	0	97,23
pH 1: 2,5	CE <sup>2</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>						
Água	(dS/m)		(mg/dm <sup>3</sup> )								
7,13	0,34	35,6	38,6	1,3	1,1						
ATRIBUTOS FÍSICOS											
(%)										Classificação textural	
DS (%)	DP	PT	Gdis	Gflo	AG	AF	Silte	Argila	Areia Franca		
1,77	3,03	4,38	41,5	62,3	37,7	42,88	10,3	7,03			

## 4.6. DADOS COLETADOS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS

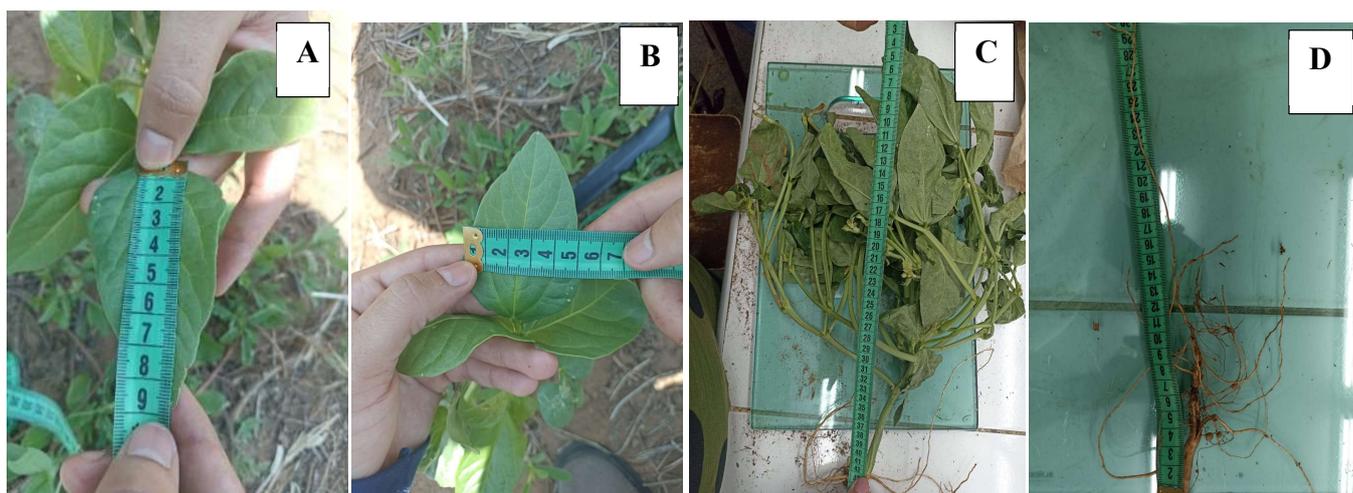
### 4.6.1. Análise biométrica, e biomassa vegetal e de grãos

Algumas plantas foram colhidas com 50 dias após a emergência das plântulas, período que coincide com a plena floração, colocadas em sacos de papel e levadas para o Laboratório do Programa de Pós Graduação em produção vegetal da UFRPE/UAST. As raízes foram lavadas com água corrente e, posteriormente foi realizada a contagem do número de rizóbios, e seguida a medição do comprimento (CR, cm), e a pesagem da raiz com balança analítica de precisão para obtenção do peso fresco. O mesmo procedimento foi realizado para a parte aérea da planta,

e o material foi colocado para a secagem em estufa de circulação forçada de ar a 55°C por 48 h, sendo posteriormente pesadas para obtenção de peso seco.

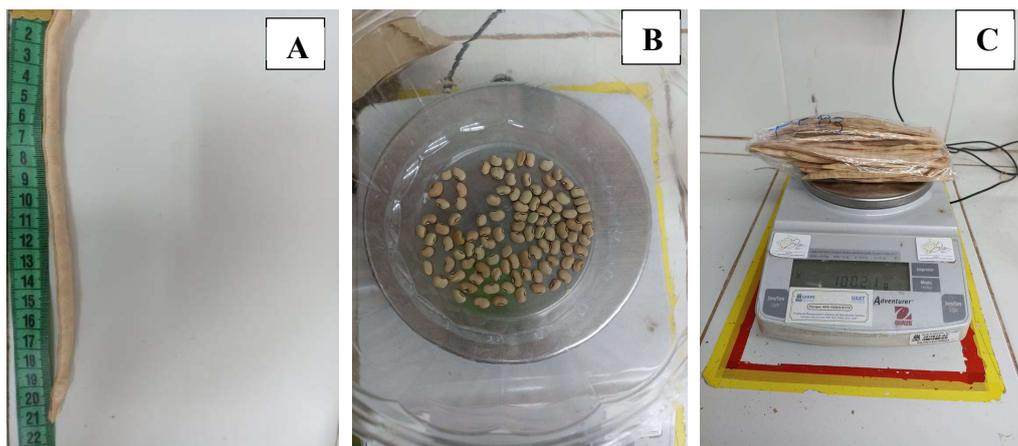
Foram avaliadas as seguintes características: Número de nódulos - ND (und. Planta<sup>-1</sup>); Número de folhas NF (und. Planta<sup>-1</sup>); Diâmetro do caule-DC (mm); Massa fresca da parte aérea - MFPA (g planta<sup>-1</sup>); e seca da parte aérea - MSPA (g planta<sup>-1</sup>); Massa fresca de raízes -MFR (g .planta<sup>-1</sup>) e seca das raízes -MSR (g.planta<sup>-1</sup>). Aos 75 dias após a emergência das plântulas foi realizado a colheita das vagens, e realizada as seguintes análises, a contagem e a pesagem do número de vagens -NV por plantas em cada tratamento, depois foram separadas 10 vagens e foi realizado a medida do comprimento das vagens -CV com régua graduada e o peso das vagens (PV) com balança analítica de precisão. Depois foram acondicionadas em sacos de papel e submetidas à secagem em estufa de circulação forçada de ar a 55°C por 48 h, sendo posteriormente pesadas para obtenção de peso constante de grãos, para eliminação total da umidade e obtenção da massa constante de 13% de umidade. Em seguida, as amostras foram pesadas para obter a matéria seca (grãos) e os valores extrapolados para se obter a massa por hectare. O rendimento de grão (produtividade) foi estimado pela coleta dos grãos das vagens de 12 plantas de cada parcela, que foram debulhadas e retirada e feita também retirada uma amostra de 100 grãos por tratamento.

**Figura 9.** Comprimento foliar (A); Largura foliar (B); Comprimento da parte aérea (C); Comprimento da raiz (D).



Fonte: Autor, 2024.

**Figura 10.** Comprimento da vagem (A); Peso de 100g (B); Peso das vargens (C).

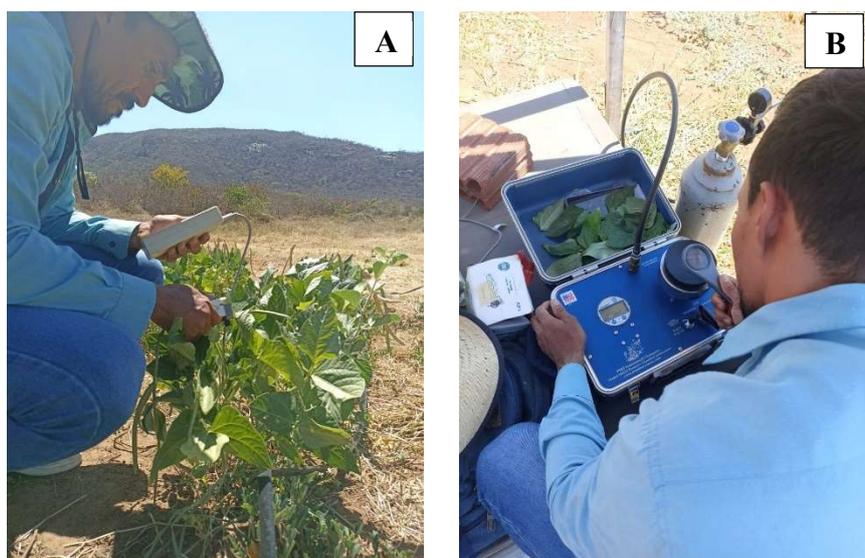


Fonte: Lisbôa (2024).

#### 4.6.2. Potencial hídrico e condutância estomática

A condutância estomática foi avaliada aos 70 dias após a emergência das plântulas, foi utilizado um porômetro portátil (*SC-1 Leaf Porometer*), sendo realizadas no horário da tarde (12:00), foi escolhido este horário para observar como as plantas lidam com o estresse térmico e hídrico, já que a condutância estomática pode diminuir devido ao fechamento estomático (Li et al., 2021). Para isso, foi escolhido a folha do terceiro nó, totalmente expandida e livre de patógenos. O potencial hídrico foliar foi medido durante a tarde (13:00h), foi escolhido este horário para observar a captura do potencial hídrico mínimo, mostrando o ponto de maior estresse hídrico durante o dia (Li et al., 2021), utilizando uma câmara de pressão tipo *Scholander*, modelo 1505D-EXP, com capacidade de até 100 bar. Para a realização do potencial hídrico, foi escolhido um ramo proveniente do terceiro nó, feito um corte em bisel próximo a gema foliar e adicionado a câmara para análise, as medidas de potencial hídrico do xilema foram convertidas para MPa (Borchert, 2002).

**Figura 11.** Comprimento da vargem (A); Peso de 100g (B); Peso das vargens (C).



Fonte: Autor, 2024.

#### **4.6.3. Enzimas antioxidantes: superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX)**

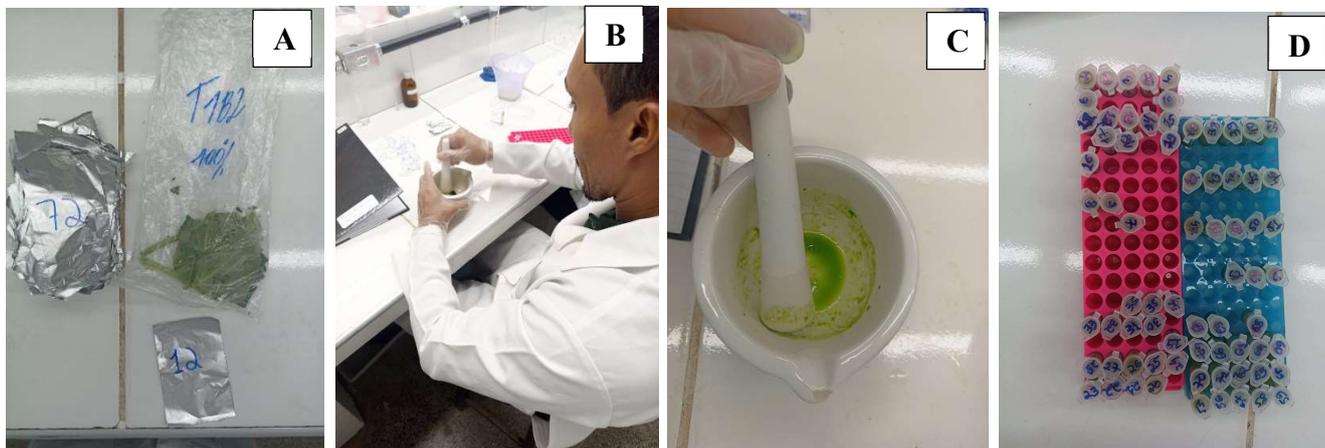
A atividade da superóxido dismutase (SOD) foi determinada de acordo com a metodologia proposta por Giannopolitis e Ries (1977), com adaptações. Aliquotas de 100  $\mu\text{L}$  do sobrenadante foram adicionadas a 1660  $\mu\text{L}$  de tampão fosfato de potássio (50 mM) (pH 7,8) contendo 1  $\mu\text{M}$  de EDTA e metionina 13 mM, 200  $\mu\text{L}$  de cloreto de tetrazólio azul Nitro (NBT) (1 mM) e 40  $\mu\text{L}$  de riboflavina (1 mM).

A atividade da catalase (CAT) foi determinada de acordo com a metodologia proposto por Cakmak et al. (1993) e por Havir e Mchale, (1987), com modificações. Para o teste foram utilizadas alíquotas de 25  $\mu\text{L}$  do extrato enzimático foram adicionados a 25  $\mu\text{L}$  de água ultrapura e 900  $\mu\text{L}$  de tampão fosfato de potássio (50 mM, pH 7,0) e mantidas em banho-maria a 27 °C. No momento da leitura, 50  $\mu\text{L}$  de  $\text{H}_2\text{O}_2$  (20 mM) foi então adicionado.

A atividade da ascorbato peroxidase (APX) foi determinada segundo metodologia proposta por (Nakano e Asada, 1981), com adaptações. Para o ensaio foram utilizadas alíquotas de 25  $\mu\text{L}$  do extrato enzimático, as quais foram adicionados a 25  $\mu\text{L}$  de água ultrapura e 900  $\mu\text{L}$  de tampão fosfato de potássio (111 mM; pH 7,0), 50  $\mu\text{L}$  de ácido ascórbico ácido (10 mM) e

mantido em banho-maria à temperatura de 27 °C por 5 min. No momento da leitura foram então adicionados 50 µL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (30 mM).

**Figura 12.** Amostra foliar (A); Maceração da folha (B), Folha macerada (C); Amostras no microtubo de centrifuga (D).



Fonte: Autor, 2024.

#### 4.6.4. Análise do conteúdo nutricional

Após secagem, foi determinada a massa seca da parte aérea (MSPA) e em seguida procedeu-se a moagem das amostras em moinhos, modelo de Willey com peneira de 2mm para as análises químicas de macro e micronutrientes. A digestão das amostras foi feita com uma mistura de H<sup>2</sup>SO<sup>4</sup> concentrado e H<sup>2</sup>O<sup>2</sup> (Thomas et al., 1967) digestão ácida descrito por Teixeira et al. (2017). Os nutrientes foram quantificados usando espectrofotômetro UV (P), fotometria de chama (K) e de absorção atômica (Ca<sup>+2</sup> e Mg<sup>+2</sup>, Cu, Zn, Fe e Mn) (Embrapa, 1999). O N foi realizado pelo método de Kjeldahl por destilação com arraste a vapor (Bremner e Mulvaney 1982). A obtenção dos conteúdos de N, P, K, Ca, Mg e na parte vegetativa e grãos foram estimados pelo produto entre os teores dos respectivos nutrientes e o rendimento de matéria seca e expressos em kg ha<sup>-1</sup>.

#### 4.7. EFICIÊNCIA NO USO DA ÁGUA E ANÁLISE DOS INDICADORES DE EFICIÊNCIA ECONÔMICA

##### 4.7.1. PRODUTIVIDADE DA ÁGUA DA CULTURA (\*WPC)

Foi calculada sendo a relação entre o rendimento de matéria seca final da cultura (Y) e o total de água envolvida na produção durante todo o ciclo (P + I) (Fernández et al., 2020), conforme a equação:

$$WP_c = \frac{Y}{P+I} \quad (2)$$

##### 4.7.2. PRODUTIVIDADE ECONÔMICA BRUTA DA ÁGUA DE IRRIGAÇÃO (\*GEWPI)

Foi calculado a partir da relação entre a margem bruta (Margem bruta = Receitas - Custos variáveis) (em qualquer moeda; nesse caso foi utilizado a moeda brasileira em real R\$) e a irrigação aplicada durante todo o ciclo de cultivo (Fernández et al., 2020). Conforme a Equação:

$$GEWPI = \frac{\text{Margem bruta}}{\Sigma I} \quad (3)$$

##### 4.7.3. ANÁLISE ECONÔMICA DO USO DE IRRIGAÇÃO

Para análise econômica do uso de irrigação foi realizado levantamento dos valores da compra dos equipamentos em comércios de produtos agropecuários gerando o orçamento total do projeto. Considerou-se, como equipamentos: tubulações, conexões, conjunto moto-bomba, filtros e válvulas da sucção ao recalque. Foram computados os custos fixos de depreciação dos componentes do sistema (DC) e dos juros sobre o capital investido (JC); e os custos variáveis de energia elétrica (CEE), de mão de obra (CMO) e manutenção dos componentes do sistema (CMC). Para o cálculo dos custos de depreciação dos equipamentos foi usada a equação (Fernandes et al., 2008).

$$DC = \frac{[(VAC) - (0,2x VAC)]}{VU} \quad (4)$$

onde, DC = depreciação do componente do sistema (R\$); VAC = valor de aquisição do componente (R\$); VAC = valor residual ou de sucata (R\$); VU = vida útil (anos). O valor residual ou de sucata foi calculado por 20% do valor de compra do componente.

O custo de oportunidade foi medido com o custo dos juros do mercado financeiro sobre o capital investido (JC), considerando uma taxa de 7,2% ao ano sobre o valor de aquisição dos equipamentos conforme equação (Frizzone e Andrade Júnior, 2005)

$$JC = TAJ \times VAE \quad (5)$$

em que, JC = juros sobre o capital investido (R\$); TAJ = taxa anual de juros (%) e VAE = valor de aquisição dos equipamentos (R\$).

Os custos de energia elétrica foram obtidos considerando o valor cobrado pelo kWh (R\$ = 0,72 kWh) pela companhia energética de Pernambuco – CELPE (2024), para classe rural irrigante - consumo da madrugada (21:30h às 6h) - Res. Norm. ANEEL 207/06; tempo em horas anuais de funcionamento do equipamento (média 444 h ano<sup>-1</sup>) e potência exigida do conjunto motobomba (5 cv), pela equação (Mendonça, 2001):

$$CEE = V_{kWh} \times T \times \left( \frac{736 \times Pot}{1000 \times \eta} \right) \quad (6)$$

onde, CE = custo com energia (R\$); VKWh = valor do kWh (R\$); T = tempo total de funcionamento do sistema de irrigação (h), variável para cada tratamento; Pot = potência do conjunto moto-bomba (cv) e  $\eta$  = rendimento do conjunto motobomba (decimal). Os custos de mão de obra e manutenção dos diferentes sistemas foram computados utilizando-se dados de Fernandes et al. (2008) e Keller & Bliesner (1990) com as equações:

$$CMO = AS \times EMS \times SM \quad (7)$$

$$CMC = VPM \times VAC \quad (8)$$

onde, CMO = custo anual de mão de obra (R\$); AS = área do sistema (ha); EMS = exigência média de mão de obra do sistema (número de homens por ha); SM = salário mínimo atual brasileiro, incluindo os encargos tributários (R\$); CMC = custo anual de manutenção dos componentes do sistema (R\$); VPM = valor percentual médio anual para manutenção dos

componentes do sistema (decimal); e VAC = valor de aquisição do componente (R\$). Os valores EMS utilizados foram: gotejamento (0,04 homem há<sup>-1</sup>), e VPM: tubulações enterradas (0,5%), tubulações em superfície (1%), estruturas (1,5%), motobombas (6%), emissores (7%) e filtros (8%). Foram adicionados 5% sobre o valor dos custos variáveis como reserva de contingência, que pode ser utilizada em casos emergenciais como falhas humanas, mecânicas ou do sistema (Fernandes et al., 2008).

Os custos referentes ao consumo de água não foram levados em consideração, visto que, na região referente à simulação ainda não se faz cobrança pelo uso da água, ou seja. Ao final das simulações, foram obtidos os custos totais de produção, receita bruta e líquida, e a relação benefício/custo por meio das equações:

$$CTP = \sum (CF + CV) \quad (9)$$

Em que, CTP = custos totais de produção (R\$); CF = custos fixos (R\$); CV = custos variáveis (R\$).

$$RB_{VF} = Y \times \text{valor}Y$$

(10)

$$RB_{VG} = (NP \times NTC) \times \text{valor}PG \quad (11)$$

onde, RB<sub>VF</sub> = receita bruta obtida pela venda do feijão (R\$); RB<sub>VG</sub> = receita bruta obtida pela venda do feijão em grãos (R\$); Y = rendimento da cultura (kg ha<sup>-1</sup>); valorY = valor do rendimento da cultura (R\$ kh.<sup>-1</sup>), considerando R\$ 4,00 kg.<sup>-1</sup>; NP = número de plantas (número de plantas ha<sup>-1</sup>); NTPG = peso dos grãos (kg); valorPG = valor do peso do grãos (R\$ 4 kg.<sup>-1</sup>), considerando R\$ 4,00 , 1kg de grãos do feijão-caupi:

$$RL_{VF} = RB - CTP \quad (12)$$

$$RL_{VC} = RB - CTP \quad (13)$$

onde, RL = receita líquida (R\$).

$$\frac{B}{C} = \frac{RL}{CTP} \quad (14)$$

onde, B/C = relação benefício/custo (>1, indica viabilidade econômica). Em casos, em que os valores por tonelada de grãos ou unidade de planta não indicaram viabilidade econômica, foi calculado o custo unitário de produção por meio da equação 15:

$$CUP = \frac{Y \text{ ou NTC}}{CTP} \quad (15)$$

onde, CUP = custo unitário de produção (R\$ ton<sup>-1</sup> ou R\$ unid.<sup>-1</sup>). Obtido o valor do CUP, foi acrescentado a este 10% como sendo o lucro mínimo desejado no empreendimento, definindo assim, o preço de venda a ser adotado em cada caso para garantia de viabilidade econômica. A vida útil dos equipamentos foi obtida de Fernandes et al. (2008) e Frizzone e Andrade Jr. (2005), que consideraram 8 anos para o sistema de irrigação por gotejamento. Desse modo, a fim de verificar o tempo de retorno do investimento no sistema de irrigação durante a vida útil do sistema de irrigação (1, 4 e 20 ciclos) através da extrapolação dos valores de rendimento e número total de plantas para períodos de 3 meses, foram simulados os seguintes cenários:

- Cenário 1: Admitindo-se que rendimento dos grãos foram obtidos após três meses, sendo este considerado como o primeiro ciclo de cultivo. Foi considerado o custo total de produção equivalente a este ciclo produtivo de modo a obterem-se os custos fixos e variáveis, receitas bruta, líquida e relação benefício/custo;

- Cenário 2: Considerando os rendimentos estimados para um período 4º ciclos (9 meses) de cultivo, foi considerado a renovação de toda área de cultivo considerando um período de um mês de cultivo para o outro, a partir do 1º ciclo, ou seja, do segundo ao quarto ciclo de cultivo do plantio de feijão-caupi. Nesse cenário, os custos totais de produção estiveram relacionados apenas com os custos variáveis (DC, JC, CEE, CMO, CMC e RC), uma vez que a cultura já estava implantada e com sistema de irrigação em operação. No (s) caso (s) em que a relação benefício/custo foi < 1, ou seja, os gastos com o sistema foram superiores a receita líquida, parte da receita líquida do 4º ciclo foi destinada ao pagamento dos custos com a implantação da cultura;

- Cenário 3: Para este caso, também foi considerado a renovação de toda área de cultivo com a remoção dos plantios anteriores provenientes do (5º ao 20º ciclo), mantendo-se apenas o sistema de irrigação, e posteriormente o semeio de novos grãos. O rendimento foi obtido para um

período de 60 meses, a partir do 20º ciclo, ou seja, do segundo ao quinto ano de cultivo do feijão-caupi. Nesse caso, foram levados em consideração todos os custos de implantação da cultura (CFs e CVs), uma vez que o feijão-caupi foi totalmente renovado.

#### 4.8. TRATAMENTOS DOS DADOS E ANÁLISE ESTATÍSTICAS

As análises estatísticas foram realizadas pelo software R-studio R version 4.3.3, as médias foram submetidas à análise de variância (ANOVA) pelo Teste F e para aquelas em que o F for significativo, foram realizados os testes de comparação entre as médias utilizando o teste de Scott Knot a 5% de probabilidade, foi realizado também análise de componentes principal - PCA.

Os dados de eficiência do uso da água e de viabilidade econômica foram realizados pelo software R-studio R version 4.3.3, as médias foram submetidas à análise de variância (ANOVA) pelo Teste F e para aquelas em que o F for significativo, foram realizados os testes de comparação entre as médias utilizando o teste de Tuckey a 5% de probabilidade pelos gráficos foram criados no programa computacional SIGMAPLOT versão 15.0.

### 5. RESULTADOS

#### 5.1. BIOMETRIA, BIOMASSA, RENDIMENTO DE GRÃOS, E FISIOLÓGICO

Os parâmetros de crescimento e biomassa no presente estudo, foram considerando indicadores primários para avaliar o efeito dos tratamentos no desenvolvimento da cultura. Como observado na (Tab. 2). Houve efeito interativo para a combinação entre os fertilizantes e os níveis de irrigação, na irrigação plena houve efeito significativo para as variáveis altura de planta (AP)  $p < 0,003\%$ , diâmetro do caule (DC), área foliar (AF), tamanho da raiz (TR), número de folhas vivas (NFV), número de nódulos (ND), massa seca total (MSTotal), massa seca dos grãos (MSG)  $p < 0,0001\%$ , não houve interação para as variáveis comprimento de vargens (CV) e peso de 100 grão (P100G).

Na irrigação deficitária, houve efeito significativo para altura de planta, área foliar, número de nódulos, comprimento de vargens, número de vargens massa seca da planta, massa seca total, massa seca dos grãos, rendimento de grãos  $p < 0,0001\%$ , tamanho da raiz  $p < 0,001\%$

e pessoa de 100 grãos  $p < 0,009\%$ , não houve interação para as variáveis diâmetro do caule e número de folhas vivas. O tratamento ARB 1,14 em plena irrigação, apresentou as maiores médias diferenciando-se estatisticamente dos demais tratamentos, para as variáveis altura de planta 48,95 (cm), área foliar 94,15 (mm), número de folhas vivas 47,95 (und), massa seca da parte aérea 81,15 (g), massa seca total 67,15 (g), rendimento de grãos 2.105,00 (kg.ha<sup>-1</sup>). O tratamento ABR 1,14 quando comparado com o tratamento controle apresentou resultados expressivo com 12,15% para altura de planta, 31,68% para área foliar, 11,21% no número de folhas vivas, 43,62% na massa seca da parte aérea, 12,25% na massa seca total e 22,09% no rendimento de grãos quando comparado com o controle nas mesmas condições.

Observa-se que para a variável diâmetro do caule, os tratamentos adubo N, NFB16 A e NFB 16B, o BIO 5050 e O BIO 7020 em plena irrigação apresentaram as maiores médias, no entanto não houve diferença significativas entres os tratamentos. Na variável número de nódulos, o tratamento NFB, ARB 1,14, e o BIO 7020 em plena irrigação apresentaram as maiores médias, não havendo diferença significativa entre os tratamentos nas mesmas condições.

Ao observar os tratamentos controle, adubo N, NFB 16A, ARB 1, 14 e o BIO 7020 no sistema de irrigação com déficit hídrico, para variável altura de planta apresentaram as maiores médias, não havendo diferença significativa entre si. Para variável tamanho da raiz o tratamento NFB 16B se destacou com a maiores médias de 34,50 (cm), com incremento de 38,05%. Para a variável massa seca da parte aérea, os tratamentos controle, NFB 16A, e ARB 1,14 apresentaram as maiores médias, contudo, não tiveram diferenças significativas entre si. Quando observado o tratamento ARB 1,14 com déficit de irrigação, mesmo se destacou com as maiores médias para massa seca dos grãos 47,65 (g) e rendimento de grãos 1.442,00 (kg.ha<sup>-1</sup>), com incremento de 33,47% para massa seca dos grãos e 12,13% no rendimento de grãos quando comparado com o controle nas mesmas condições.

**Tabela 2.** Efeito da aplicação de diferentes fertilizantes e isolados rizobianos em condição de irrigação plena e déficit na biometria altura de planta (AP), diâmetro do caule (DC), área foliar (AF), tamanho da raiz (TR), número de folha viva (NFV), número de nódulos (ND), comprimento de vargens (CV), número de vargens (NV); Na biomassa massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), massa seca total (MST); No rendimento de grão (REND.G), massa seca dos grãos (MSC), Peso de 100 grãos (P100G) no do feijão-caupi em Serra Talhada – PE, Brasil.

TRATAMENTOS	AP (cm)	DC (mm)	AF (cm)	TR (cm)	NFV (und)	ND (und)	CV (cm)	NV (und)	MSPA (g)	MSTotal (g)	MSG (g)	P100G (g)	REND.G (kg.ha <sup>-1</sup> )
Plena*Controle	43b	8,0b	64,32d	26,32a	44,17b	70,50b	20,72a	7,65a	45,75d	58,92b	41d	18,05a	1640,75d
Plena*Adubo N	43,25b	9,25a	85,45b	26,87a	40,50c	57c	19,70a	5,87c	60,57b	57,92b	40,80d	18,87a	1631,25d
Plena*BR 3267	45,12b	8,27b	80,37b	27,02a	45,25b	48,25d	21,45a	5,32c	65,12b	63,95a	49b	18,30a	1960,50b
Plena*NFB 16A	44b	8,92a	82,90b	26,75a	38,75c	67b	21,30a	5,02c	53,20c	58,52b	44,97c	17,70a	1799,50c
Plena*NFB 16B	44,12b	8,92a	84,15b	24,75a	45,50b	77,55a	21,82a	5,3c	33,35f	58,70b	43,50c	19,30a	1740,25c
Plena*ARB 1,14	48,95a	8,50a	94,15a	19,07b	49,75a	83,70a	22,52a	6,90b	81,15a	67,15a	52,62a	19,35a	2105,00a
Plena*BIO5050	41,02b	7,05a	82,72b	27,62a	38,75c	68b	22,50a	5,35c	46,85d	38,30e	25,05f	18,55a	1002,00f
Plena*BIO7020	44,87b	9,17a	70,22c	25,10a	40,75c	78a	22,92a	5,37c	50,77c	54,27c	42d	17,25a	1681,00d
Plena*BIO50	45,12b	7,02c	73,15c	25a	44b	64,50b	21,62a	5,32c	40,30e	45,20d	33,97e	17,72a	1358,00e
Pr > F(NI*Adubo)	0,003	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,05	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,13	0,0001
Significativo	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim
Déficit*Controle	41,75a	7,5a	66,92b	21,37b	44,17a	35,65a	20,60a	8,02b	46,15a	42,30b	31,70b	17,97a	1268,50b
Déficit*Adubo N	44,75a	7,02a	72,4a	22,5b	29,75a	26,75b	21,20a	6,67c	35,50b	44,67b	32,92b	16,57b	1316,75b
Déficit*BR 3267	38,6b	7,3a	65,3c	20,25b	45,25a	32,50a	18,02b	8,65a	26,85c	35,20c	23,80c	16,85b	951,00c
Déficit*NFB 16A	40,55a	7,55a	63,35c	23,15b	38,75a	36,47a	20,20a	8,12b	42,50a	32,47c	21,42c	15,75b	875,50c
Déficit*NFB 16B	37,5b	7,0a	62,05c	34,50a	45,50a	34a	20a	8,65a	37,45b	36,25c	24,52c	16,32b	981,00c
Déficit*ARB 1,14	41,00a	7,37a	56,57d	21b	32,20a	33,25a	21,52a	9,10a	47,05a	47,65a	36,05a	17,87a	1442,0a
Déficit*BIO5050	37,37b	7,15a	64,57c	18,5b	38,75a	33a	17,07b	5,50d	29,80c	35,97c	24c	15,75b	959,50c
Déficit*BIO7020	42a	7,5a	62,27c	23,82b	40,75a	29,57b	19,92a	7,72b	30,97c	34,25c	24,20c	15,75b	968,00c
Déficit*BIO50	40,75b	7,25a	64,25c	22,25b	44a	30,25b	21,50a	6,67c	37,77b	36c	23,80c	18,47a	951,00c
Pr > F(NI*Adubo)	0,0001	0,88	0,0001	0,001	0,13	0,04	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,009	0,0001
Significativo	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

\* Para cada tratamento, os valores médios com as mesmas letras em cada coluna não são significativamente diferentes entre si  $p < 0,05$  (Teste Scott Knott).

Para as variáveis fisiobioquímicas, observa-se (**Tab. 3**) que houve efeito interativo para a combinação entre os fertilizantes e os níveis de irrigação, na irrigação plena houve efeito significativo para condutância estomática (gs), para catalase (CAT), ascobato peroxidase  $p < 0,0001\%$ , não havendo efeito para o potencial hídrico (PH) e superóxido desmutase (SOD). Na irrigação deficitária, houve efeito significativo para o potencial hídrico, condutância estomática e catalase, não havendo efeito para o ascobato peroxidase e ascobato peroxidase. A

variável catalase o tratamento BIO 5050 em plena irrigação apresentou a maior média entre os demais tratamentos diferenciando-se estatisticamente dos demais com média de 332,20 ( $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2 \text{ mg}^{-1} \text{ protein min}^{-1}$ ) e incremento de 13,94% quando comparado com o controle nas mesmas condições. Ao analisar os tratamentos no déficit de irrigação, o BIO 5050 apresentou a maiores médias 88,57 ( $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2 \text{ mg}^{-1} \text{ protein min}^{-1}$ ), com incremento de 12,66% para a condutância estomática, quando comparado com o controle nas mesmas condições. Para a variável catalase o tratamento NFB 16A com déficit hídrico, se destacou significativamente dos demais tratamentos, com média de 307,10 ( $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2 \text{ mg}^{-1} \text{ protein min}^{-1}$ ).

**Tabela 3.** Efeito da aplicação de diferentes fertilizantes e isolados rizobianos em condição de irrigação plena e deficit nos parâmetros Fisiobioquímico potencial hídrico (PH), condutância estomática (gs), Catalase (CAT), superóxido desmutase (SOD) e ascorbato peroxidase (APX) no do feijão-caupi em Serra Talhada – PE, Brasil.

TRATAMENTOS	PH (Mpa)	gs (mmol/m <sup>2</sup> /s)	CAT ( $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2 \text{ mg}^{-1} \text{ protein min}^{-1}$ )	APX ( $\mu\text{mol AsA mg}^{-1} \text{ protein min}^{-1}$ )	SOD ( $\mu\text{mol AsA mg}^{-1} \text{ protein min}^{-1}$ )
Plena*Controle	1,24a	108,42a	285,87b	7073,62b	0,62a
Plena*Adubo N	1,28a	110,82a	296,77b	8000,37b	0,87a
Plena*BR 3267	1,19a	106,90a	275,92c	8153,40b	0,57a
Plena*NFB 16A	1,37a	111,40a	244,62d	9410,25a	0,70a
Plena*NFB 16B	1,31a	107,92a	304,07b	8152,97b	0,60a
Plena*ARB 1,14	1,29a	107,75a	302,07b	7666,42b	0,62a
Plena*BIO5050	1,27a	80,42b	332,20a	7791,52b	0,60a
Plena*BIO7020	160a	112,10a	249,02d	7760,72b	0,80a
Plena*BIO50	1,38a	37,00c	332,20a	8575,42a	0,82a
Pr > F(NI*Adubo)	0,08	0,0001	0,0001	0,0001	0,4
Significativo	Não	sim	sim	sim	sim
Déficit*Controle	1,55a	77,35b	262,25b	8535,07a	0,62a
Déficit*Adubo N	1,45a	46,90d	277,67b	8533,50a	0,875a
Déficit*BR 3267	1,46a	47,50d	281,37b	8514,20a	0,57a
Déficit*NFB 16A	1,94b	50,02d	330,42a	8442,65a	0,70a
Déficit*NFB 16B	1,57a	47,32d	307,10a	8463,65a	0,60a
Déficit*ARB 1,14	1,69a	66,37c	268,15b	9198,07a	0,62a
Déficit*BIO5050	1,67a	88,57a	279,30b	8719,60a	0,60a
Déficit*BIO7020	1,63a	44,55d	253,47b	8470,87a	0,80a
Déficit*BIO50	1,38a	44,27d	309,02a	8523,52a	0,82a
Pr > F(NI*Adubo)	0,002	0,0001	0,0001	0,78	0,05
Significativo	Sim	sim	sim	não	não

\* Para cada tratamento, os valores médios com as mesmas letras em cada coluna não são significativamente diferentes entre si  $p < 0,05$  (Teste Scott Knott).

Analisou-se que na absorção (**Tab. 4**) Para efeito de absorção dos nutrientes pela planta houve efeito de interação apenas para o adubo químico N ( $P < 0,05\%$ ), no entanto, o nitrogênio não apresentou diferença significativa no sistema de irrigação plena, para os tratamentos NFB 16 A 40,67 (g/kg), NFB 16B 40,67 (g/kg), E ARB 1,14 41,08 (g/kg) no sistema com déficit hídrico. Entre os tratamentos aplicados, o tratamento ARB 1,14 apresentou a maior média nos dois sistemas de irrigação, promoveu melhoria significativa de 14,57% quando comparada com o controle em plena irrigação, promoveu melhoria de 17,65% na combinação com o déficit.

**Tabela 4.** Absorção de macro (N, P, K, N, Ca e Mg) e micro (Fe, Mn, Zn e Na) de diferentes fertilizantes e isolados rizobianos em condição de irrigação plena e déficit hídrico pela cultura do feijão-caupi em Serra Talhada – PE, 2023.

TRATAMENTOS	N (g/kg)	TRATAMENTOS	P(g/kg)	K(g/kg)	Na(g/kg)	Ca(g/kg)	Mg(g/kg)	Zn(mg/kg)	Fe(mg/kg)	Mn(mg/kg)
Plena*Controle	35,00a	Controle	4,08	19,1	1,26	6,18	7,57	79,15	427,78	109,37
Plena*Adubo N	39,37a	Adubo N	3,81	19,63	1,18	6,11	7,62	73,55	357,37	106,07
Plena*BR 3267	37,45a	BR 3267	3,86	17,95	1,15	5,98	8,12	74,42	345,12	99,92
Plena*NFB 16A	36,30a	NFB 16A	4,13	20,15	1,26	5,63	7,33	74,05	329,1	103,37
Plena*NFB 16B	32,45a	NFB 16B	4,38	20,18	1,15	6,08	7,38	79,72	336,12	115,27
Plena*ARB 1,14	41,02a	ARB 1,14	4,13	19,63	1,06	6,05	7,26	79,2	341,75	112,35
Plena*BIO5050	34,75a	BIO5050	3,95	19,25	1,17	6,01	8,27	76,12	347,6	92,87
Plena*BIO7020	36,62a	BIO7020	4,11	20,62	1,18	5,61	7,41	77,65	320,52	90,55
Plena*BIO50	38,00a	BIO50	4	20,38	1,17	5,82	7,25	78,9	288,52	105
Pr > F(NI*Adubo)	0,02		0,15	0,87	0,35	0,3	0,94	0,87	0,28	0,15
Significativo	Não		Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Déficit*Controle	34,42b									
Déficit*Adubo N	34,40b									
Déficit*BR 3267	35,07b									
Déficit*NFB 16A	40,67a									
Déficit*NFB 16B	42,62a									
Déficit*ARB 1,14	41,80a									
Déficit*BIO5050	37,05b									
Déficit*BIO7020	38,55b									
Déficit*BIO50	36,72b									
Pr > F(NI*Adubo)	0,003									
Significativo	Sim									

\* Para cada tratamento, os valores médios com as mesmas letras em cada coluna não são significativamente diferentes entre si  $p < 0,05$  (Teste Scott Knott). N=Nitrogênio, P=Fósforo, K=Potássio, Na=Sódio, Ca=Cálcio, Mg=Magnésio, Zn=Zinco, Fe=Ferro, Mn=Manganês.

Para as variáveis nutricionais, observa-se que a exportação (**Tab. 5**) que houve efeito interativo para a combinação entre os fertilizantes e os níveis de irrigação, na irrigação plena houve efeito significativo apenas para o nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), zinco (Zn), manganês (Mn)  $p < 0,0001\%$ , sódio (Na)  $P < 0,0006\%$ , ferro (Fe)  $p < 0,01\%$ . Na irrigação deficitária, houve efeito significativo para nitrogênio  $p < 0,001\%$ , potássio  $p < 0,03\%$ , cálcio  $p < 0,0003\%$ , zinco  $p < 0,01\%$ , ferro  $p < 0,005\%$  e manganês  $p < 0,09\%$ . Não houve efeito para fósforo, sódio e magnésio.

O tratamento ARB 1,14 em plena irrigação, apresentou as maiores médias diferenciando-se estatisticamente dos demais tratamentos, para as variáveis nitrogênio 110,24 ( $\text{kg}/\text{há}^{-1}$ ) e fósforo 11,68( $\text{kg}/\text{há}^{-1}$ ), com incremento de 20,42% para nitrogênio e 32,95% para o fósforo quando comparado com os demais tratamentos nas mesmas condições. Observou-se que para o potássio os tratamentos adubos, BR3267, NFB 16A, NFB 16B e o ARB 1,14 em plena irrigação apresentaram as maiores médias, no entanto, não houve diferença significativas entre esses tratamentos, contudo, o tratamento ARB 1,14 apresentou um incremento de 32,95% quando comparado com o controle na mesma condição. Para o cálcio os tratamentos controle, adubo N, BR 3267, e o ARB 1,14 14 em plena irrigação apresentaram as maiores médias, no entanto, não houve diferença significativas entre esses tratamentos. Analisando o magnésio os tratamentos controle, adubo N, BR 3267, NFB 16B e o ARB 1,14 14 em plena irrigação apresentaram as maiores médias, no entanto, não houve diferença significativas entre esses tratamentos. Para o zinco, os tratamentos BR 3267, NFB 16B e o ARB 1,14 14 em plena irrigação, apresentaram as maiores médias, no entanto, não houve diferença significativas entre esses tratamentos, o tratamento ARB 1,14 apresentou um incremento de 80,67% quando comparado com o controle na mesma condição. Verificou-se na variável do ferro os tratamentos controle, adubo, BR 3267 e NFB 16A em plena irrigação apresentaram as maiores médias, no entanto, não houve diferença significativas entre esses tratamentos. Para o manganês, os tratamentos BIO 7020 em plena irrigação, apresentou a menor média entre os tratamentos, sendo o único que apresenta diferença significativas entre esses tratamentos.

O tratamento ARB 1,14, apresentou a maior média no tratamento nitrogênio 79,66 ( $\text{kg}/\text{há}^{-1}$ ), com déficit hídrico diferenciando dos demais tratamento, apresentando um

incremento de 33,36%, quando comparado com o controle nas mesmas condições. Observou-se que para o potássio o adubo N 38,75 (kg/há<sup>-1</sup>), e o ARB 1,14 39,43(kg/há<sup>-1</sup>), com déficit hídrico apresentaram as maiores médias, não diferenciando-se entre si, mas diferenciando dos demais tratamentos. com incremento de 22,14% para o adubo N e 20,77% para o ARB 1,14, quando comparado com o controle no mesmo tratamento.

**Tabela 5.** Exportação de macro (N, P, K, N, Ca e Mg) e micro (Fe, Zn, Mn e Na) de diferentes fertilizantes e isolados rizobianos em condição de irrigação plena e déficit hídrico pela cultura do feijão-caupi em Serra Talhada – PE, 2023.

TRATAMENTOS	Next (kg/ha)	Pext (kg/ha)	Kext (kg/ha)	Naext (kg/ha)	Caext (kg/ha)	Mgext (kg/ha)	Znext (g/ha)	Feext (g/ha)	Mnext (g/ha)
Plena*Controle	82,72c	8,72b	33,32b	3,06a	15350a	13,24a	171,85b	888,30a	258,38a
Plena*Adubo N	91,13b	9,39b	40,73a	2,79a	15,75a	13,20b	169,24b	913,98a	235,33a
Plena*BR 3267	95,69b	9,70b	45,64a	2,93a	15,86a	15,64a	189,19a	945,42a	261,86a
Plena*NFB 16A	84,83c	8,32b	42,93a	2,57a	13,98b	13,17b	170,69b	850,28a	287,63a
Plena*NFB 16B	76,38c	9,82b	47,16a	2,59a	15,75b	13,34a	189,19a	675,14b	275,68a
Plena*ARB 1,14	110,24a	11,68a	49,70a	2,51a	16,20a	15,94a	213,02a	751,81b	327,49a
Plena*BIO5050	53,16e	5,77c	27,74b	1,85b	9,37c	8,57c	111,98c	528,54b	133,18a
Plena*BIO7020	94,44c	8,67b	42,68a	2,50a	12,13c	13,33c	168,08b	720,10b	177,80b
Plena*BIO50	68,71d	6,40c	35,44b	2,08b	10,72c	10c	139,42c	579,49b	172,54a
Pr > F(NI*Adubo)	0,0001	0,0001	0,0001	0,006	0,0001	0,0001	0,0001	0,01	0,0001
Significativo	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Déficit*Controle	58,23b	7,49a	30,73b	1,85a	9,79a	8,95a	144,94a	801,43a	182,91a
Déficit*Adubo N	63,21b	6,37a	38,75a	2,06a	11,31a	9,30a	132,05a	568,43b	197,81a
Déficit*BR 3267	49,79b	5,50a	24,96b	1,60a	8,14b	7,84a	105,71b	447,50b	134,80a
Déficit*NFB 16A	52,64b	6,01a	28,72b	1,76a	6,88b	6,33a	92,92b	379,17b	108,82a
Déficit*NFB 16B	61,89b	6,77a	29,29b	1,75a	7,85b	6,94a	113,72b	554,39b	165,58a
Déficit*ARB 1,14	79,66a	7,46a	39,43a	2,31a	11,54a	10,06a	150,87a	768,33a	194,88a
Déficit*BIO5050	53,14b	5,90a	29,29b	1,66a	8,53b	7,70a	113,91b	509,92b	140,39a
Déficit*BIO7020	52,96b	5,78a	29,62b	1,66a	7,68b	7,19a	106,46b	421,59b	136,85a
Déficit*BIO50	52,84b	6,46a	30,51b	2,02a	8,25b	6,77a	115,51b	374,59b	162,99a
Pr > F(NI*Adubo)	0,0001	0,33	0,03	0,33	0,0003	0,05	0,01	0,005	0,09
Significativo	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Sim	Sim

\* Para cada tratamento, os valores médios com as mesmas letras em cada coluna não são significativamente diferentes em  $p < 0,05$  (Teste Scott Knott). N=Nitrogênio, P=Fósforo, K=Potássio, Na=Sódio, Ca=Cálcio, Mg=Magnésio, Zn=Zinco, Fe=Ferro, Mn=Manganês.

Para as variáveis nutricionais, observa-se que a extração (**Tab. 6**) que houve efeito interativo para a combinação entre os fertilizantes e os níveis de irrigação, na irrigação plena houve efeito significativo para o nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), sódio (Na), cálcio (Ca), magnésio (Mg), zinco (Zn), manganês (Mn)  $p < 0,0001\%$ , ferro (Fe)  $p < 0,002\%$ . Na irrigação deficitária, houve efeito significativo para nitrogênio, cálcio, zinco  $p < 0,0001\%$ , potássio  $p < 0,002\%$ , fósforo  $p < 0,02$ , ferro  $p < 0,0005\%$ , manganês  $p < 0,03\%$ . Não houve efeito para fósforo, sódio e magnésio. Observou-se que o tratamento ARB 1,14 em plena irrigação, apresentou as maiores médias diferenciando-se estatisticamente dos demais tratamentos, para as variáveis nitrogênio  $86,47 \text{ (kg/há}^{-1}\text{)}$ , fósforo  $9,15 \text{ (kg/há}^{-1}\text{)}$  e zinco  $166,80 \text{ (kg/há}^{-1}\text{)}$ , com incremento de  $33,36\%$  para nitrogênio,  $33,40\%$  para o fósforo e  $28,47\%$  para o zinco quando comparado com os demais tratamentos nas mesmas condições.

Para a variável potássio, os tratamentos BR 3267, NFB 16A, NFB 16B, ARB 1,14 e 7020 em plena irrigação, apresentaram as maiores médias, no entanto, não houve diferença significativas entre esses tratamentos, o tratamento ARB 1,14 apresentou um incremento de  $40,77\%$ , quando comparado com o controle na mesma condição. Ao analisar cálcio os tratamentos controle, BR 3267, NFB 16A, NFB 16B e o ARB 1,14 em plena irrigação, apresentaram as maiores médias, no entanto, não houve diferença significativas entre esses tratamentos. Para o magnésio, os tratamentos BR 3267 e ARB 1,14 apresentaram as maiores médias, no entanto, não houve diferença significativas entre esses tratamentos, o tratamento ARB 1,14 apresentou um incremento de  $33,60\%$  e  $16,93\%$  para BR 3267 quando comparado com os demais tratamentos nas mesmas condições. Analisando o manganês, percebeu-se que os tratamentos BIO 7020 em plena irrigação, apresentou a menor média entre os tratamentos, sendo o único que apresenta diferença significativas entre esses tratamentos. Verificou-se que o tratamento ARB 1,14 com déficit hídrico, apresentou as maiores médias diferenciando-se estatisticamente dos demais tratamentos, para as variáveis nitrogênio com média de  $60,23 \text{ (kg/há}^{-1}\text{)}$ , fósforo  $5,61 \text{ (kg/há}^{-1}\text{)}$ , com incremento para nitrogênio,  $27,61\%$  e  $33,77\%$  para o fósforo quando comparado com os demais tratamentos nas mesmas condições.

**Tabela 6.** Exportado de macro (N, P, K, Ca e Mg) e micro (Fe, Mn, Zn e Na) de diferentes fertilizantes e isolados rizobianos em condição de irrigação plena e déficit hídrico pela cultura do feijão-caupi em Serra Talhada – PE, 2023.

TRATAMENTOS	Nexp (kg/ha)	Pexp (kg/ha)	Kexp (kg/ha)	Naexp (kg/ha)	Caexp (kg/ha)	Mgexp (kg/ha)	Znexp (g/ha)	Feexp (g/ha)	Mnexp (g/ha)
Plena*Controle	57,62d	6,06b	23,02b	2,13a	10,80a	13,24b	119,31b	615,75a	181,01a
Plena*Adubo N	64,22c	6,60b	28,77b	1,98a	9,51b	13,20b	119,33b	647,28a	165,38b
Plena*BR 3267	73,35b	7,40b	35,05a	2,25a	12,17a	15,64a	143,89b	726,18a	200,57a
Plena*NFB 16A	65,30c	6,38b	33,27a	1,99a	10,76a	13,17b	131,07b	651,35a	223,48a
Plena*NFB 16B	56,56d	7,26b	34,91a	1,91a	11,67a	13,35b	140,14b	500,09a	203,53a
Plena*ARB 1,14	86,47a	9,15a	38,87a	1,98a	12,71a	15,94a	166,80a	588,85b	255,90a
Plena*BIO5050	34,83e	3,78c	18,26b	1,21b	6,09b	8,57c	73,32d	344,92b	88,02c
Plena*BIO7020	61,44c	6,69b	33,08a	1,94a	9,39b	13,33b	130,01b	559,20a	137,63b
Plena*BIO50	51,64d	481,00c	26,63b	1,15b	6,09b	10,00c	105,03c	434,01b	130,06b
Pr > F(NI*Adubo)	0,0001	0,0001	0,0001	0,001	0,0001	0,0001	0,0001	0,002	0,0001
Significativo	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Déficit*Controle	43,60b	5,64a	23,09b	1,52a	7,32a	8,95a	108,51a	599,99a	137,04a
Déficit*Adubo N	46,57b	4,61b	28,58a	1,52a	8,32a	9,30a	97,33a	418,52b	168,75b
Déficit*BR 3267	33,34c	3,73b	17,08b	1,09a	5,47b	7,84a	71,74b	303,14b	92,06b
Déficit*NFB 16A	34,65c	3,96b	18,88b	1,16a	4,53b	6,33a	64,32b	249,52b	71,91a
Déficit*NFB 16B	41,81b	4,57b	19,87b	1,18a	5,30b	6,94a	76,36b	375,29b	112,05b
Déficit*ARB 1,14	60,23a	5,61a	29,83a	1,75a	8,75a	10,06a	114,36a	580,24a	147,79a
Déficit*BIO5050	35,37c	3,92b	19,47b	1,10a	5,71b	7,70a	75,89b	340,99b	93,39b
Déficit*BIO7020	37,40c	4,08b	20,93b	1,16a	5,42b	7,19a	75,26b	297,92b	96,27b
Déficit*BIO50	34,89c	4,25b	20,09b	1,34a	5,44b	6,77a	76,36b	245,53b	108,04b
Pr > F(NI*Adubo)	0,0001	0,02	0,002	0,08	0,0001	0,05	0,0001	0,0005	0,03
Significativo	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Sim	Sim

\* Para cada tratamento, os valores médios com as mesmas letras em cada coluna não são significativamente diferentes em  $p < 0,05$  (Teste Scott Knott). N=Nitrogênio, P=Fósforo, K=Potássio, Na=Sódio, Ca=Cálcio, Mg=Magnésio, Zn=Zinco, Fe=Ferro, Mn=Manganês.

## 5.2.INTERAÇÃO DOS FERTILIZANTES APLICADOS E ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

O mapa de calor posiciona os tratamentos na ordem (Tab. 7 e 8) que confere uma maior representação numérica das médias dentro das variáveis, o mesmo acontece para a distribuição de cores que varia do vermelho para efeito de tratamento com o maior número de médias até o azul para efeito de menor número de médias. Do total de 46 variáveis representadas, o tratamento ARB 1,14 apresentou as melhores médias em 25 delas, representando 45,65% das variáveis, sendo representada dentro deste percentual 10,9% biometria, 2,1% biomassa, 2,19% da absorção, 15,3 % da extração e 17,5% da exportação dos nutrientes.

O resultado da PCA (**Fig. 13**) identificaram dois componentes principais (PC1 e PC2) que explicaram 39,39% e 12,17% do total, no entanto, 70% da PCA foi explicada com a componente 3. A distribuição das variáveis é de acordo com o seu distanciamento e posicionamento no eixo, a MST 0,93 e o REND G 0,90, (**Fig. 13A**) apresentaram uma correlação positiva no eixo 1, e uma contribuição alto percentual de 8,8% MST e 8,3% para REND G. É notável que outras variáveis presente no eixo 1 como NFV, AF, NV, AP contribuem para que a planta tenha um bom REND G. A PCA (**Fig. 13 B**) apresenta o ARB 1,14 como o tratamento de maior correlação entre os demais, englobado no mesmo eixo1 indicando que o tratamento ARB ,14 promoveu o aumento de MST e REND G.

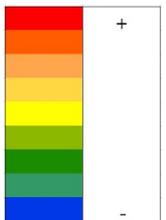
Resumidamente, existe uma correlação positiva entre as variáveis de biometria, biomassa e rendimento de grãos pela planta, esse resultado é claramente observado no tratamento ARB 1,14 que apresentou as maiores médias nestas variáveis, o que possibilitou o maior rendimento de grãos pela cultura em condições de plena irrigação.

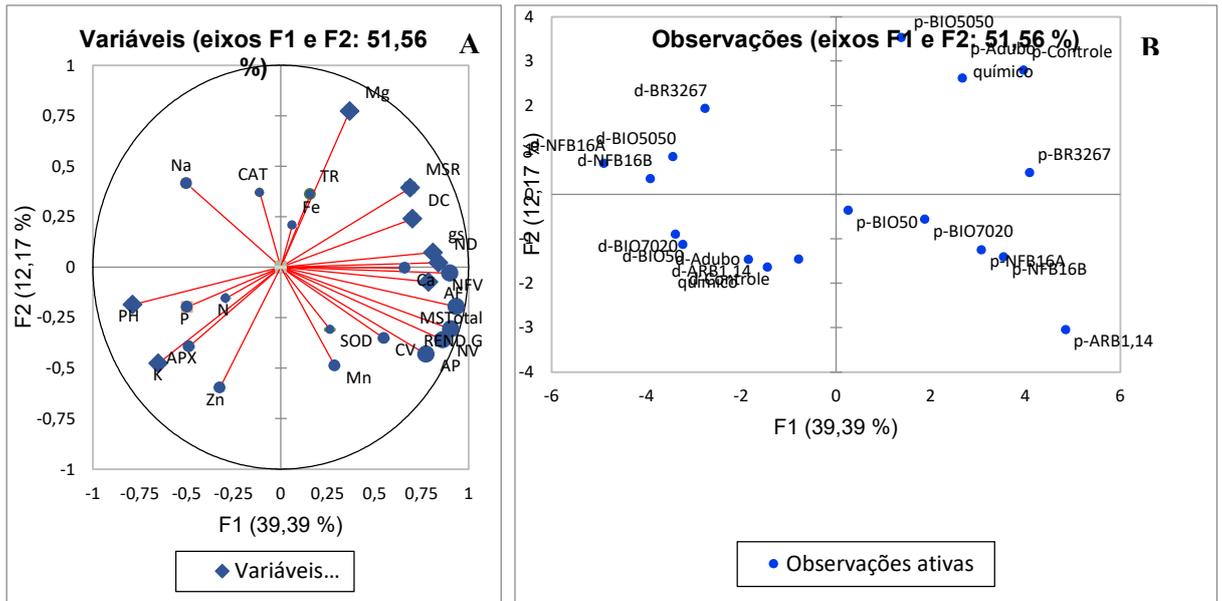
**Tabela 7.** Mapa de calor efeito da aplicação de diferentes fertilizantes e isolados rizobianos em condição de irrigação plena e déficit na biometria (AP, DC, AF, TR, NFV, ND, CV, NV), biomassa (MSPA, MSR, MST) rendimento (REND. G, MSG, P100G), potencial hídrico P PH), condutância estomática (gs), enzimas antioxidantes (CAT, APX, SOD), absorção N, P, K, Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Mn pela cultura do feijão-caupi em Serra Talhada – PE, Brasil.

Tratamentos	AP	DC	AF	TR	NFV	ND	CV	NV	MSPA	MSR	MSG	MSTotal	P100G	REND.G
Plena*ARB1,14	48,95	8,50	94,15	19,08	49,75	83,70	22,50	9,11	13,19	1,34	52,63	67,16	19,36	1503,60
Plena*BR3267	45,13	8,28	80,37	27,03	45,25	48,25	21,45	8,64	13,15	1,80	49,02	63,96	18,29	1400,53
Plena*NFB16B	44,13	7,90	84,16	24,75	45,50	77,55	21,83	8,64	13,70	1,52	43,50	58,72	19,30	1242,90
Plena*NFB16A	44,00	8,93	82,89	26,75	38,75	67,00	21,30	8,11	11,99	1,53	44,99	58,50	17,73	1285,34
Plena*Adubo químico	43,25	9,23	85,44	26,88	40,50	57,00	19,70	6,69	15,22	1,94	40,78	57,93	18,88	1165,09
Plena*Controle	43,00	8,00	64,32	26,33	44,18	70,50	20,73	8,03	15,99	1,90	41,02	58,91	18,03	1171,94
Plena*BIO7020	44,88	9,18	70,22	25,10	40,75	78,00	22,93	7,72	10,89	1,38	42,02	54,28	17,26	1200,46
Déficit*ARB1,14	41,00	7,38	56,58	21,00	32,20	33,25	21,53	6,89	9,96	1,62	36,05	47,63	17,88	1029,91
Plena*BIO50	45,13	7,03	73,12	25,00	44,00	64,50	21,63	6,67	9,75	1,50	33,95	45,20	17,72	970,07
Déficit*Adubo químico	44,75	7,03	72,40	22,50	29,75	26,75	21,20	5,86	10,37	1,39	32,92	44,67	16,55	940,53
Déficit*Controle	41,75	7,50	66,95	21,38	27,75	35,65	20,60	7,64	9,27	1,34	31,71	42,32	17,97	906,07
Plena* BIO5050	41,03	9,00	82,74	27,63	38,75	68,00	22,50	5,50	11,78	1,47	25,04	38,29	18,56	715,43
Déficit*NFB16B	37,50	7,00	62,05	34,50	28,83	34,00	20,20	5,31	10,41	1,35	24,52	36,27	16,31	700,46
Déficit*BIO50	40,75	7,25	64,23	22,25	31,60	30,25	21,50	5,33	11,01	1,22	23,77	36,00	18,46	679,05
Déficit* BIO5050	37,38	7,17	64,58	18,50	27,43	33,00	17,06	5,36	10,69	1,30	23,98	35,96	15,75	685,11
Déficit*BIO7020	42,00	7,50	62,26	23,83	30,33	29,58	19,93	5,39	8,98	1,07	24,19	34,24	17,37	691,18
Déficit*NFB16A	40,55	7,55	63,34	23,15	30,83	36,48	20,00	5,03	9,96	1,17	21,43	32,56	15,75	612,36
Déficit*BR3267	38,60	7,30	65,30	20,25	27,65	32,50	18,03	5,33	10,14	1,29	23,77	35,19	16,84	679,05
Tratamentos	PH	gs	CAT	APX	SOD	N	P	K	Na	Ca	Mg	Zn	Fe	Mn
Plena*ARB1,14	1,30	107,75	302,75	7666,42	0,73	41,00	4,35	18,54	0,94	6,03	7,54	79,30	279,90	122,20
Plena*BR3267	1,19	106,91	275,93	8153,40	0,82	37,44	3,78	17,93	1,16	6,21	7,97	73,30	369,85	102,00
Plena*NFB16B	1,31	107,92	304,09	8152,96	0,76	32,48	4,15	20,02	1,10	6,74	7,71	80,95	287,80	116,20
Plena*NFB16A	1,37	111,38	244,64	9410,27	0,77	36,31	3,56	18,32	1,10	5,97	7,35	72,90	364,30	122,20
Plena*Adubo químico	1,28	110,81	296,77	8000,39	0,56	39,37	4,06	17,60	1,21	5,83	8,12	73,20	396,35	101,35
Plena*Controle	1,25	108,43	285,90	7073,65	0,73	35,00	3,71	14,25	1,32	6,56	8,05	72,50	382,30	109,75
Plena*BIO7020	1,60	112,09	249,05	7760,72	0,69	36,63	4,00	19,64	1,16	5,59	7,35	77,55	331,30	81,70
Déficit*ARB1,14	1,69	66,38	268,17	9198,10	0,62	41,80	3,92	20,74	1,21	6,06	6,98	79,10	403,60	102,50
Plena*BIO50	1,39	37,01	278,35	8575,42	0,59	38,00	3,55	19,58	1,16	5,93	7,40	77,15	320,95	95,10
Déficit*Adubo químico	1,46	46,90	277,68	8533,56	0,86	35,39	3,57	21,67	1,16	6,34	7,10	73,90	318,40	110,80
Déficit*Controle	1,58	77,36	262,26	8535,07	0,63	34,45	4,43	17,97	1,10	5,79	7,10	85,80	473,27	108,27
Plena* BIO5050	1,27	80,41	332,21	7791,53	0,73	34,74	3,78	18,15	1,21	6,10	8,59	73,05	346,20	87,40
Déficit*NFB16B	1,57	47,32	307,07	8463,66	0,57	42,62	4,65	20,35	1,21	5,41	7,05	78,50	384,45	114,35
Déficit*BIO50	1,39	44,26	309,03	8523,52	0,82	36,72	4,48	21,23	1,43	5,72	7,11	80,65	256,10	114,90
Déficit* BIO5050	1,68	88,56	279,30	8719,60	0,59	37,03	4,12	20,35	1,16	5,92	7,97	79,20	349,00	98,35
Déficit*BIO7020	1,63	44,53	253,47	8407,88	0,79	38,56	4,21	21,62	1,21	5,62	7,46	77,75	309,75	99,40
Déficit*NFB16A	1,94	50,03	330,43	8442,66	0,71	40,66	4,66	22,00	1,43	5,28	7,36	75,20	293,90	84,55
Déficit*BR3267	1,47	47,48	281,36	8514,20	0,57	35,04	3,94	17,99	1,16	5,76	8,22	75,55	320,40	97,85

**Tabela 8.** Extração da parte aérea e exportação para os grãos de N, P, K, Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Mn pela cultura do feijão-caupi em Serra Talhada – PE, 2023.

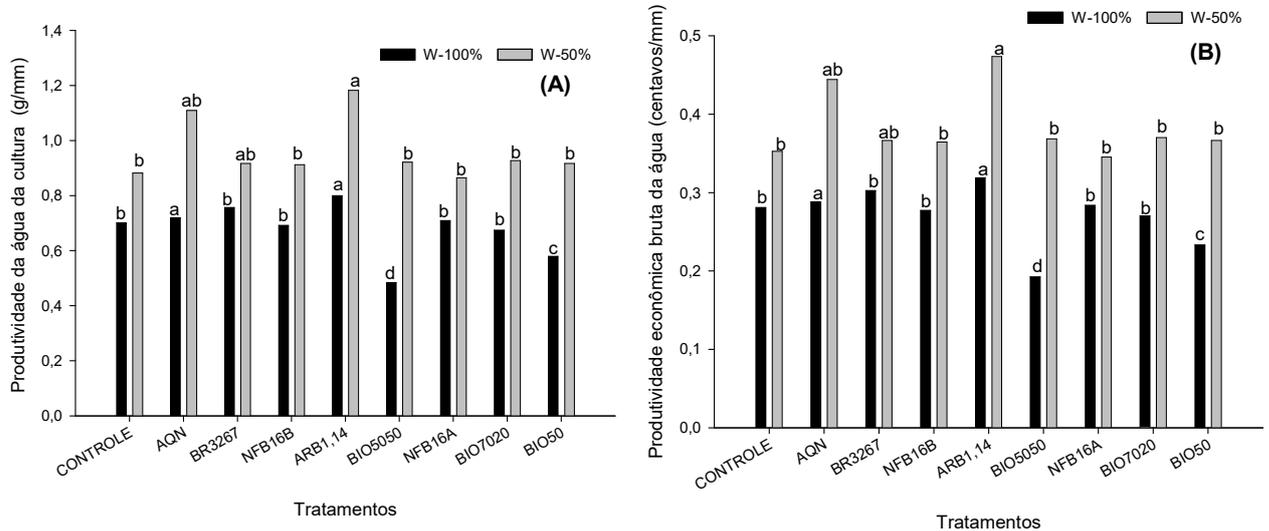
Tratamentos	Next	Pext	Kext	Naext	Caext	Mgext	Znext	Feext	Mnext	Nexp
Plena*ARB1,14	78,74	8,34	35,51	1,80	11,58	14,50	152,16	537,01	233,92	61,77
Plena*BR3267	68,35	6,93	32,60	2,10	11,33	14,59	134,31	675,35	187,04	52,39
Plena*NFB16B	54,55	7,02	33,69	1,85	11,25	12,84	135,14	482,24	196,92	40,41
Plena*NFB16A	60,60	5,94	30,67	1,84	9,99	12,24	121,92	607,35	205,45	46,65
Plena*Adubo químico	65,09	6,71	29,10	2,00	9,65	13,43	120,89	652,85	168,09	45,87
Plena*Controle	59,09	6,23	23,74	2,19	11,07	13,61	122,75	634,50	184,56	41,16
Plena*BIO7020	56,74	6,19	30,49	1,79	8,66	11,36	120,06	514,36	127,00	43,89
Déficit*ARB1,14	56,89	5,33	28,17	1,65	8,24	9,51	107,77	548,81	139,16	43,03
Plena*BIO50	49,08	4,57	25,32	1,49	7,66	9,53	99,59	413,93	123,25	36,89
Déficit*Adubo químico	45,16	4,55	27,68	1,47	8,08	9,04	94,33	406,02	141,30	33,27
Déficit*Controle	41,60	5,35	21,95	1,32	6,99	8,55	103,53	572,45	130,65	31,15
Plena* BIO5050	37,97	4,13	19,81	1,32	6,69	9,42	79,99	377,53	95,13	24,88
Déficit*NFB16B	44,21	4,84	20,92	1,25	5,61	7,36	81,23	396,00	118,27	29,87
Déficit*BIO50	37,75	4,59	21,79	1,45	5,90	7,32	82,51	267,57	116,43	24,92
Déficit* BIO5050	37,96	4,22	20,92	1,19	6,10	8,22	81,37	364,23	100,28	25,27
Déficit*BIO7020	37,83	4,13	21,16	1,19	5,49	7,27	76,04	301,14	97,75	26,71
Déficit*NFB16A	37,60	4,30	20,52	1,26	4,92	6,86	69,94	270,86	77,73	24,75
Déficit*BR3267	35,14	3,93	17,83	1,14	5,82	8,40	75,51	319,65	96,29	23,82
Tratamentos	Pexp	Kexp	Naexp	Caexp	Mgexp	Znexp	Feexp	Mnexp		
Plena*ARB1,14	6,53	27,77	1,42	9,08	11,39	119,14	420,61	182,79		
Plena*BR3267	5,29	25,02	1,61	8,70	11,18	102,78	518,70	143,27		
Plena*NFB16B	5,19	24,93	1,37	8,34	9,54	100,10	357,21	145,38		
Plena*NFB16A	4,56	23,77	1,42	7,69	9,41	93,62	465,25	159,63		
Plena*Adubo químico	4,72	20,55	1,41	6,80	9,43	85,24	462,34	118,13		
Plena*Controle	4,33	16,45	1,53	7,72	9,46	85,23	439,82	129,29		
Plena*BIO7020	4,78	23,63	1,39	6,71	8,81	92,86	399,43	98,31		
Déficit*ARB1,14	4,03	21,31	1,25	6,25	7,19	81,69	414,46	105,57		
Plena*BIO50	3,44	19,03	1,12	5,73	7,15	75,02	310,01	92,90		
Déficit*Adubo químico	3,35	20,42	1,08	5,95	6,64	69,52	298,95	104,11		
Déficit*Controle	4,01	16,50	0,99	5,24	6,40	77,51	428,57	97,89		
Plena* BIO5050	2,70	13,05	0,87	4,35	6,13	52,38	246,38	62,87		
Déficit*NFB16B	3,27	14,19	0,85	3,79	4,96	54,92	268,07	80,04		
Déficit*BIO50	3,04	14,35	0,96	3,89	4,84	54,54	175,38	77,17		
Déficit* BIO5050	2,81	13,91	0,79	4,08	5,50	54,21	243,57	66,71		
Déficit*BIO7020	2,92	14,95	0,83	3,88	5,14	53,76	212,81	68,76		
Déficit*NFB16A	2,83	13,49	0,83	3,24	4,52	45,94	178,23	51,37		
Déficit*BR3267	2,67	12,20	0,78	3,91	5,60	51,25	216,53	65,76		





**Figura 13.** Análise de componentes principais para biometria (AP, DC, AF, TR, NFV, ND, CV, NV), biomassa (MSPA, MSR, MST) rendimento (REND. G, MSG, P100G), potencial hídrico (PH), condutância estomática (gs), enzimas antioxidantes (CAT, APX, SOD), absorção, e exportação de N, P, K, Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Mn (A); Plena irrigação x controle, ARB 1,14, Adubo químico, BIO50, BIO5050, BIO7020, NFB16A, NFB16B, BR3267; ); Deficit hídrico x controle, ARB 1,14, Adubo químico, BIO50, BIO5050, BIO7020, NFB16A, NFB16B, BR3267 na cultura do feijão-caupi em Serra Talhada – PE, Brasil (B).

### 5.3. EFICIÊNCIA NO USO DA ÁGUA (INDICADORES ECONÔMICOS) E ANÁLISE FINANCEIRA



**Figura 14.** Produtividade da água da cultura (A), produtividade econômica da água de irrigação (B) do feijão-caupi com aplicação de biofertilizantes isolados rizobianos, em condição de irrigação plena (W-100) e déficit hídrico (W-50%) para um hectare, em Serra Talhada – PE, Brasil.

Ao analisar a relação da produtividade da água da cultura (**Fig. 14A**,  $p < 0,001\%$ ), e produtividade econômica da água de irrigação (**Fig. 14B**,  $p < 0,001\%$ ), ambas obterem diferença significativa para o efeito combinado dos fertilizantes no sistema de irrigação plena e com déficit.

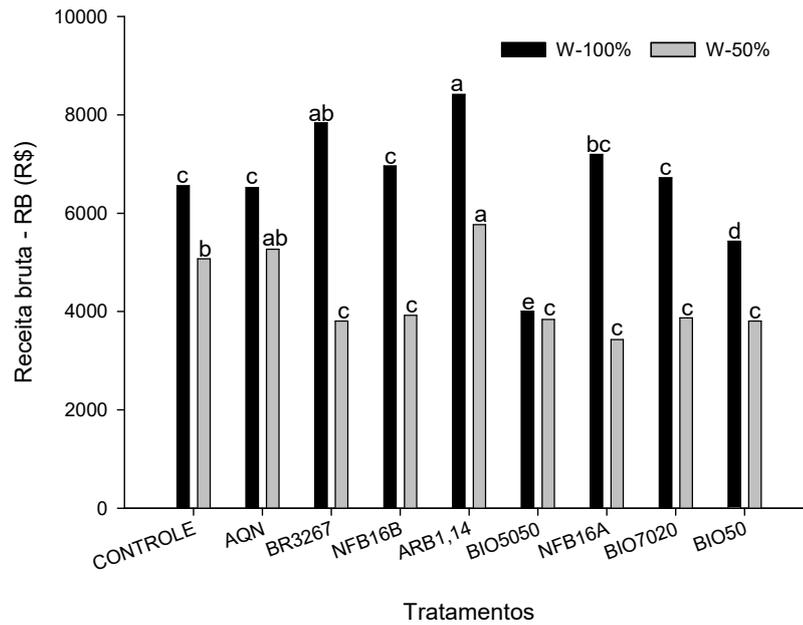
Notou-se que para a produtividade da água da cultura o tratamento ARB 1,14 com plena irrigação, possibilitou a melhor resposta entre os tratamentos dispostos, com média de 1,34 (g/mm), e um incremento de 22,36% na produtividade da água da cultura, contudo o resultado não difere significativamente do tratamento BR3267 com irrigação plena, que obteve 1,24 (g/mm) e 16% de incremento. Na lâmina de déficit hídrico o tratamento ARB 1,14 obteve a maior média de 1,80 (g/mm), que ao comparar com o controle no mesmo tratamento promoveu um incremento de 9%. Notou-se que a lâmina com déficit hídrico apresentou resultados

superiores aos de plena irrigação, o ARB 1,14 obteve um incremento 25,5% a mais quando comparada com a plena irrigação.

Notou-se que para a produtividade da água da cultura o tratamento ARB 1,14 com plena irrigação, possibilitou a melhor resposta entre os tratamentos dispostos, com média de 0,53 (centavos/mm<sup>-1</sup>), e um incremento de 22,3 na produtividade da água da cultura. O resultado não difere significativamente do tratamento BR3267 com irrigação plena, que obteve 0,49(centavos/mm<sup>-1</sup>), e 16% de incremento. Na lâmina de déficit hídrico o tratamento ARB 1,14 obteve a maior média de 0,72 (centavos/mm<sup>-1</sup>), que ao comparar com o controle no mesmo tratamento promoveu um incremento de 12%. Contudo, não diferiu do adubo químico nitrogênio que apresentou 0,65 (centavos/mm<sup>-1</sup>). Notou-se que a lâmina com déficit hídrico apresentou resultados superiores aos de plena irrigação, o tratamento ARB 1,14 obteve um incremento 26% a mais quando comparada com a plena irrigação.

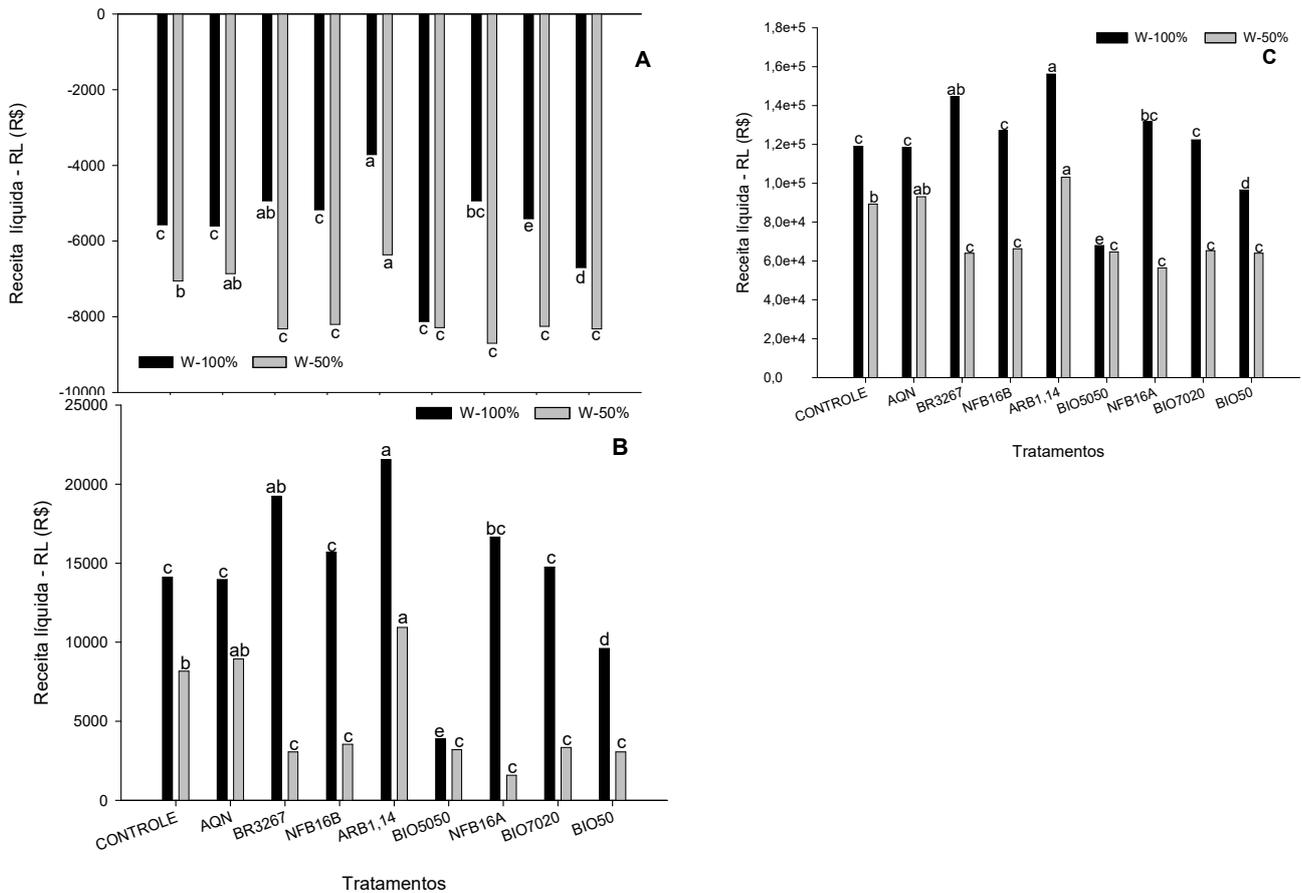
Na produtividade econômica o tratamento ARB 1,14 em plena irrigação apresentou maior média 0,5375 (g/mm<sup>-1</sup>) do nitrogênio 0,495(g/mm<sup>-1</sup>), e do controle 0,475(g/mm<sup>-1</sup>), mesmo não apresentando diferença significativa, o tratamento ARB 1,14 promoveu o incremento de 11,6% quando comparada com o controle. Para a econômica da água de irrigação os tratamentos apresentaram o comportamento semelhantes ao de produtividade da água da cultura, o tratamento ARB 1,14 com plena irrigação promoveu a maior média entre os tratamentos aplicado com 0,1625 (centavos/mm<sup>-1</sup>) e um incremento de 23,7%, não diferindo-se da aplicação do tratamento BR3267 que obteve a média de 0,1525 (centavos/mm<sup>-1</sup>) e um incremento de 18%.

Para os cálculos da análise financeira do de feijão-caupi com aplicação de biofertilizantes e isolados rizobianos, em condição de irrigação plena e déficit hídrico, o tempo de retorno de investimento foi de 5 meses para o sistema em plena irrigação (W100%) e 8 meses no sistema de déficit hídrico (W50%), o custo de produção foi de grãos foi de R\$: 7,42 na plena irrigação (W-100%) e 9,62 no déficit hídrico (W50%).



**Figura 15.** Receita bruta da análise financeira de feijão-caupi com aplicação de biofertilizantes e isolados rizobianos, em condição de irrigação plena (W100%) e déficit hídrico (W50%) para um hectare, em Serra Talhada – PE, Brasil.

Para o cálculo de receita bruta e o seu efeito em um o ciclo, quatro e vinte ciclos, observou-se a combinado entre os tratamentos e as lâminas de irrigação foi (**Fig. 15**,  $p < 0,001\%$ ). o tratamento ARB 1,14 com plena irrigação promoveu a com a maior média da receita bruta R\$: 8.420,18, o mesmo não diferindo-se do tratamento BR3267 R\$:7.842,9 o tratamento ARB 1,14 promoveu um incremento de 22% a mais de custo benéfico quando comparada com o controle, e 8% a mais quando compara com o tratamento BR 3267 que obteve 16% de incremento. Analisando o tratamento ARB 1,14 com déficit hídrico, o mesmo obteve a melhor média quando comparado com os fertilizantes nas mesmas condições, com média R\$: 5.767,50 e um incremento de 12% ao comparar com o controle na mesma condição.



**Figura 16.** Receita líquida de um ciclo (A); Custo benefício de quatro ciclos (B); Custo benefício de vinte ciclos (C) da análise financeira de feijão-caupi com aplicação de biofertilizantes e isolados rizobianos, em condição de irrigação plena (W-100%) e déficit hídrico (W-50%) para um hectare, em Serra Talhada – PE, Brasil.

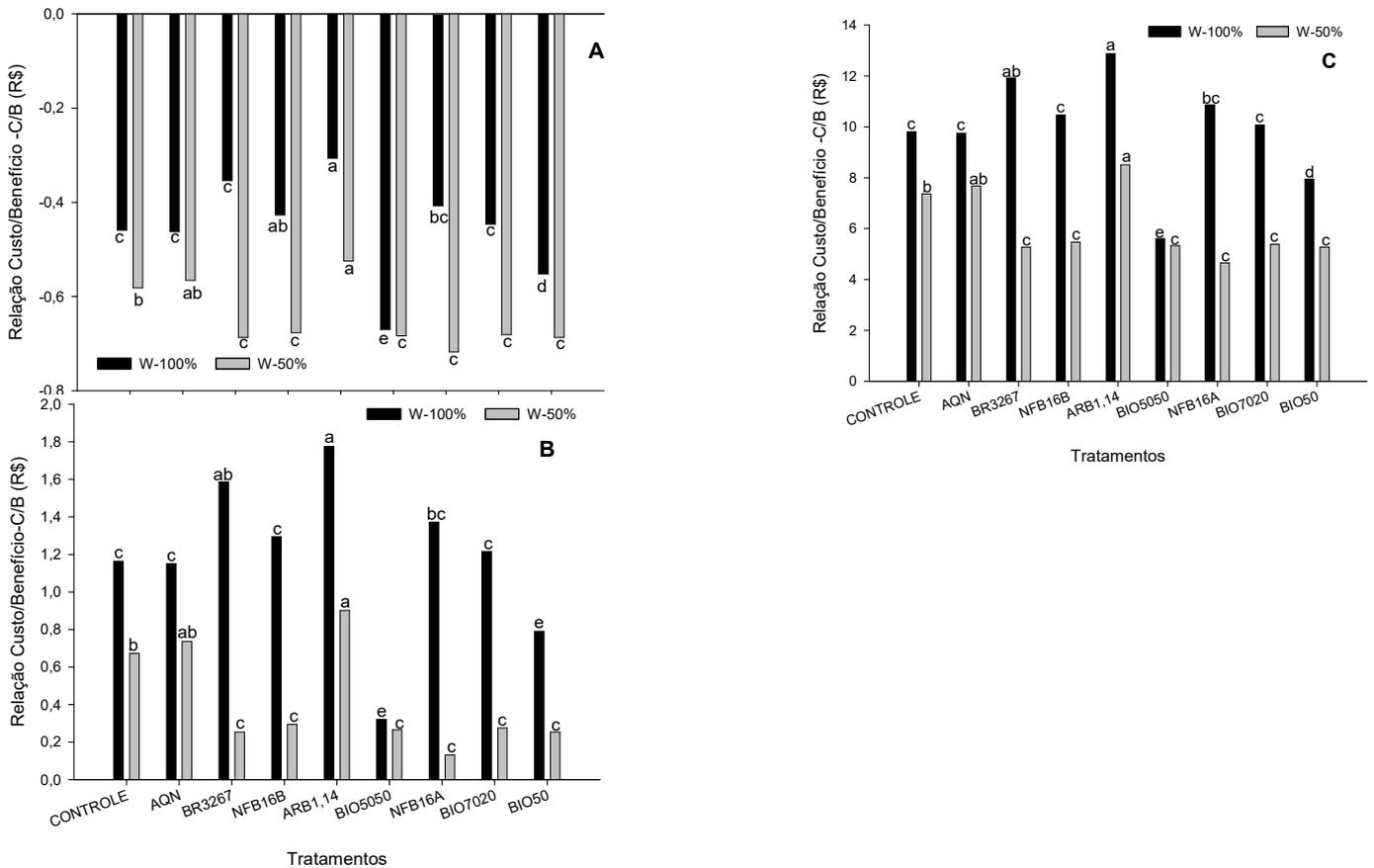
Para o cálculo de receita líquida e o seu efeito em um o ciclo, quatro e vinte ciclos, observou-se a combinado entre os tratamentos e as lâminas de irrigação foi (Fig. 16,  $p < 0,001\%$ ). Observou-se que o tratamento ARB 1,14 em plena irrigação obteve as melhores médias em todos em todos os ciclos, no primeiro ciclo (Fig. 16A) o resultado da receita líquida custeio ainda se mostraram ser negativos, contudo, ainda sendo o menor valor entre os tratamentos com R\$: -3.712 com um ciclo e R\$:21.548,1. Para quatro ciclos (Fig. 16B), é perceptível uma redução de 84% do primeiro para o quarto ciclo. O ARB 1,14 não apresentou

diferença significativa o tratamento BR3267 R\$: -4.289,64 no ciclo um e R\$: 19.239,34 no ciclo quatro.

O tratamento ARB 1,14 ainda se mostrou eficiente no sistema de déficit hídrico, e quando comparado com os demais fertilizantes na mesma condição se destacou, que apesar do valor inferior ao de plena irrigação, ainda é o mais destaque no sistema de déficit hídrico com média R\$: 10.941,5 seguido do nitrogênio 8.939,42 contudo, não apresentaram diferença significativa do controle com quatro ciclos.

No vigésimo ciclo (**Fig. 16C**), o tratamento ARB 1,14 com plena irrigação continuo a ser o melhor tratamentos, com a maior média da receita líquida R\$: 156.271,1 e mesmo não diferindo-se da aplicação de bactéria BR3267 R\$:144.727,3 o tratamento ARB 1,14 promoveu um incremento de 23% a mais de custo benéfico quando comparada com o controle, e 8% a mais quando compara com o tratamento BR 3267 que obteve 17,6% de incremento. Analisando o tratamento ARB 1,14 com déficit hídrico, o mesmo obteve a melhor média quando comparado com os fertilizantes nas mesmas condições, com média R\$: 103.221,6 e um incremento de 13,4% ao comparar com o controle na mesma condição.

Mesmo não apresentando diferença significativa entre o tratamento ARB1,14 e o tratamento BR 3267 é observado uma economia de no ciclo quatro R\$: 2.309,00 e R\$: 42.853,00 no vigésimo ciclo em sistema de plena irrigação. No sistema com déficit hídrico o tratamento ARB 1,14 obteve uma economia R\$: 2.774,0 no ciclo quatro e 13.871,00 no vigésimo ciclo quando comparado com o controle que não teve diferença significativa.



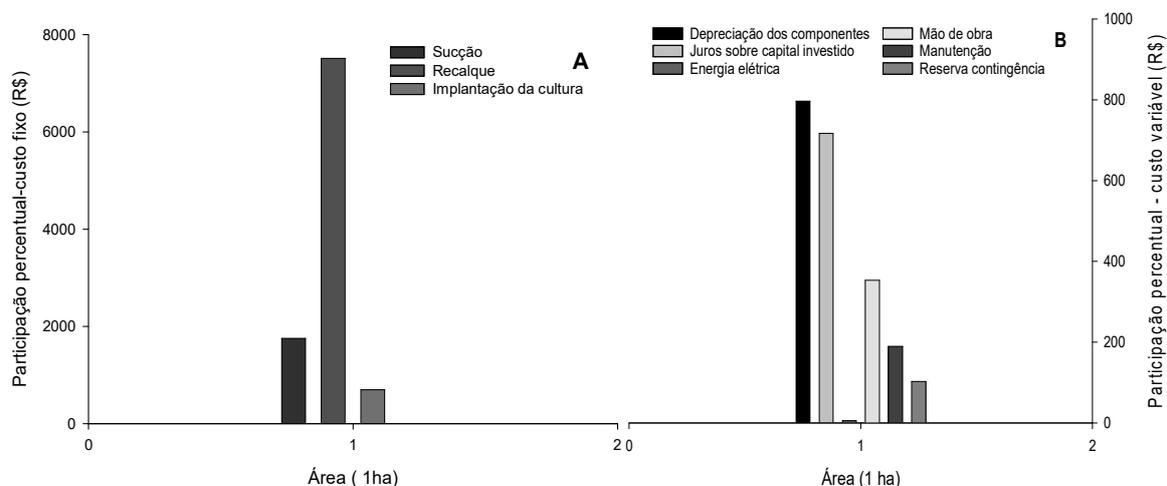
**Figura 17.** Relação Custo/Benefício de um ciclo (A); Custo de produção de grãos de quatro ciclo (B); Custo de produção de grãos de vinte ciclos (C) da análise financeira de feijão-caupi com aplicação de biofertilizantes e isolados rizobianos, em condição de irrigação plena (W-100%) e déficit hídrico (W-50%) para um hectare, em Serra Talhada-PE. Brasil.

Para o cálculo da relação custo-benefício e o seu efeito em um o ciclo, quatro e vinte ciclos, observou-se a combinado entre os tratamentos e as lâminas de irrigação foi (Fig. 17,  $p < 0,001\%$ ). Observou-se que o tratamento ARB 1,14 em plena irrigação obteve as melhores médias em todos em todos os ciclos, no primeiro ciclo (Fig. 17A) o resultado da relação custo-benefício ainda se mostraram ser negativos, contudo, obteve o menor valor entre os tratamentos com R\$: -0,30 com um ciclo e R\$: 1,77 para quatro ciclos (Fig. 17B), é perceptível uma redução de 84% do primeiro para o quarto ciclo. O ARB 1,14 não apresentou diferença significativa do tratamento BR3267 R\$: -0,46 no ciclo um e R\$: 1,58 no ciclo quatro.

O tratamento ARB 1,14 ainda se mostrou eficiente no sistema de déficit hídrico, e quando comparado com os demais fertilizantes na mesma condição se destacou, que apesar do valor inferior ao de plena irrigação, ainda é o mais destaque no sistema de déficit hídrico com a menor média R\$: 0,90 seguido do nitrogênio R4: 0,73 contudo, não apresentaram diferença significativa do controle com quatro ciclos.

No vigésimo ciclo (**Fig. 17C**), o tratamento ARB 1,14 com plena irrigação continuo a ser o melhor tratamentos, com a maior média de custo-benefício R\$: 72,88, e mesmo não diferindo-se do tratamento BR3267 R\$:11,9 o tratamento ARB 1,14 promoveu um incremento de 23% a mais de custo benéfico quando comparada com o controle, e 8% a mais quando compara com o tratamento BR 3267 que obteve 17,6% de incremento do tratamento controle. Analisando o tratamento ARB 1,14 com déficit hídrico, o mesmo obteve a melhor média quando comparado com os fertilizantes nas mesmas condições, com média R\$: 8,51 e um incremento de 13,4% ao comparar com o controle na mesma condição.

Mesmo não apresentando diferença significativa entre o tratamento ARB1,14 e o tratamento BR 3267, é observado uma economia de no ciclo quatro R\$: 0,19 e R\$: 0,96 no vigésimo ciclo em sistema de plena irrigação. No sistema com déficit hídrico o ARB 1,14 obteve uma economia R\$: 0,23 no ciclo quatro e R\$:1,15 no vigésimo ciclo quando comparado com o controle que não teve diferença significativa.



**Figura 18.** Percentual do custo fixo (A), custo variável (B) da análise financeira de feijão-caupi com aplicação de biofertilizantes e bactérias rizobianas, em condição de irrigação plena (W-100%) e déficit e hídrico (W-50%) para um hectare, em Serra Talhada – PE, 2023.

Dentro do percentual dos custos fixos e variáveis (**Fig. 18**), é notado que o maior custo acontece nos custos fixos (**Fig. 18A**), com o custeio no valor de R\$: 9.962,90 distribuído em sucção (18%), recalque (75%) e implantação da cultura (7%) dos custos, sendo o recalque o custo que mais onerou ao sistema de irrigação com R\$: 7.513,400 de todo o custo do valor necessário para compor todo esse compartimento, seguido da sucção R\$: 1.754,500 e a implantação da cultura R\$: 695,00. O custo variável (**Fig. 18B**) é bem inferior ao fixo, com valor de R\$: 2.165,49, distribuído em depreciação dos componentes (37%) que representa o valor R\$: 797,03, Juros sobre capital investido que representa (33%) dos custos com R\$: 717,33 seguido da Energia elétrica (0,1%) com R\$: 5,36, Mão de obra (16%) R\$: 353,00; Manutenção R\$: 189,77 (9%) e Reserva contingência R\$: 103,00 (5%).

A lâmina total de cada sistema seguiu a mesma para os fertilizantes aplicados, mudando apenas o sistema, e pode ser observada (**Fig. 5**) que o valor total de água utilizada na plena irrigação foi 650,79 mm e no déficit hídrico 409,47 mm, esse percentual corresponde a lâmina aplicada a parti do 8º dia após o semeio. Ao ser realizado o efeito comparativo das médias dos tratamentos para as variáveis produtividade da água da cultura, produtividade econômica da água de irrigação e custo de Receita bruta e líquida e Custo benefício as variáveis tenderam ao

mesmo comportamento, mediante a produtividade ser a variável utilizada na equação para compor essas variáveis.

## 6. DISCUSSÃO

### 6.1. EFEITO DOS FERTILIZANTES NO CRESCIMENTO, BIOMASSA E PROCESSOS FISIOLÓGICOS, CONDUTÂNCIA E, COMPONENTES DE RENDIMENTO DE GRÃOS

Os resultados demonstraram que a interação dos CNPs promoveu diversas alterações morfofisiológicas no feijão-caupi. O tratamento ARB 1,14 com plena irrigação, proporcionou um aumento significativo em algumas variáveis de crescimento, biomassa e processo fisiológico (**Tab 2.**), nano-estudos evidenciam melhoria superior nessas variáveis. A aplicação de CNPs promove o aumento no crescimento das plantas em estudo realizados por Xin et al. (2022), em que a utilização das nanopartículas carbonáceas desempenhou um incremento na altura das plantas de milho (*Zea mays* L.) em 8,42%, 12,9%, 16,5%, outros estudos com nanopartículas também destacam 11,06% de incremento para comprimento da parte aérea do trigo (Abdel-Aziz, Hasaneen, e Omer 2016). Aumento da biomassa vegetal de 70,0% na cultura do rabanete associada a micronutrientes (Mielcarz-Skalska et al., 2021). O crescimento e desenvolvimento do feijoeiro cv. Batida e maior acúmulo de biomassa (Márquez-Prieto et al., 2022).

O tratamento ARB1,14, assim como os demais tratamentos em condições de plena irrigação, apresentaram resultados superiores aos tratamentos com déficit hídrico, este resultado pode ser explicado devido ao solo ter maior umidade, permitir uma melhor absorção dessas partículas que por apresentar tamanho reduzido, propriedades de superfícies ajustáveis, permite aplicação na quantidade e forma correta (Avellan et al., 2021). As nanopartículas melhoraram os sistemas antioxidantes não enzimáticos e enzimáticos das plantas (Mielcarz-Skalska et al., 2021).

A utilização nanotubos de carbono podem regular a divisão celular e o crescimento das plantas por meio de um mecanismo molecular único que está relacionado à ativação de canais

de água (aquaporinas) e aos principais reguladores genéticos da divisão e extensão celular (Abdel-Ghany et al., 2016). Os tratamentos foram aplicados no solo e via foliar, com objetivo de uma maior amplitude na eficiência, permitindo um melhor alcance de absorção dos compostos presentes nos biofertilizantes. Os efeitos positivos dos NPs à base de carbono de sua concentração, morfologia, propriedades de superfície, modo de aplicação e tipo de espécie de planta (Chandrashekar et al., 2023). As células vegetais absorvem NPs pulverizadas foliar por endocitose através de estômatos ou cutículas na superfície da folha. As nanopartículas (NPs) aplicadas nas folhas podem ser translocadas das folhas para outras partes da planta através dos elementos do tubo crivado no floema. Quando há uma alta concentração de NPs nos elementos do tubo crivado, a água se move do xilema para o floema por osmose, impulsionando as NPs em direção aos tecidos em desenvolvimento. A descarga das NPs ocorre por transporte ativo ou passivo. Trocas osmóticas entre o floema e o xilema sugerem a possibilidade de trocas de NPs (Avellan et al., 2021). O que explica que mesmo nas condições do tratamento ARB 1,14 em sistema de déficit hídrico as plantas conseguiram se desenvolver e obter resultados superiores aos fertilizantes expostos a mesma condição.

A produtividade do feijão-caupi para todas as variáveis foi considerada maior do que a produtividade nacional, e para região Nordeste que está na faixa de 289 kg. ha<sup>-1</sup> a 654 kg. ha<sup>-1</sup> (Conab, 2018). O tratamento ARB 1,14 em plena irrigação foi muito expressivo, com o resultado superior ao encontrados por Oliveira et al. (2002), para variedade IPA 206 em um estudo com linha de feijão-caupi e com estudos realizados por Rocha et al. (2019) e, por (Souza et al., 2019), com feijão-caupi submetido a diferentes lâminas de irrigação. Para o ARB 1,14 nas duas lâminas de irrigação, os resultados corroboram com os encontrado por Sousa et al. (2022), que observou uma relação à produtividade de grãos do feijão-caupi em três anos de experimento que a diminuição da umidade do solo influencia significativamente de forma negativa a produtividade, para os demais tratamentos, os resultados se encontraram dentro da faixa de produtividade nas duas lâminas.

É esperado que a redução da lâmina de irrigação ocasione um estresse, mediante a isso, as plantas buscam alternativas para se ajustar as condições adversas. Quando a quantidade de água dentro da planta é reduzida, a taxa de respiração diminui, os estômatos fecham e o

transporte de água e nutrientes através da planta é reduzido ( Wang et al., 2023). Os biofertilizantes e os isolados rizobianos condicionaram uma resposta positiva à cultura do feijão-caupi, percebe-se ainda que mesmo em condições de estresse no sistema de déficit hídrico, as plantas ainda reduziram abertura estomática devido ao ajuste osmótico que as plantas realizam, estudo apostam que a utilização de nanopartículas a base de carbono melhoram absorção de água, ajudando a planta a reter água, alterando as paredes celulares e regulando o fechamento estomático (Chandrashekar et al., 2023). O que explica os resultados encontrado no presente trabalho, com os tratamentos em plena irrigação e com déficit hídrico. Estudos comprovam que aplicação de nanopartículas auxiliam no mecanismo de ajuste osmótico e promove condições de desenvolvimento, como resultados encontrados por Zayed et al. (2017) ao utilizar nano quitosana permitiu ao feijão resultados significativos de crescimento, área foliar, massa fresca da parte aérea e da raiz. As NPs causam uma variedade de alterações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas nas plantas, à medida que aumentam a sua resistência ao stress hídrico, aumentando a condutância hidráulica das raízes das plantas e a absorção de água. (Bashir et al., 2021).

Ao observar o número de nódulos percebe-se que o ARB 1,14 apresentou a maior média, contudo não diferiu estatisticamente dos tratamentos NFB 16B, e do BIO 7020, essa expressiva nodulação no campo é uma indicação da alta capacidade dos rizóbios estabelecidos do solo nodularem as plantas de feijão-caupi, como é frequentemente observado por Melo e Zilli (2009), o autor ainda afirma que em feijão-caupi, não existem informações conclusivas sobre o número mínimo de nódulos necessários para garantir um bom desempenho da FBN. Os resultados do experimento de campo demonstraram que as populações nativas, provavelmente associadas a solos de boa fertilidade, eram capazes de sobreviver (Rufini et al., 2014). Embora os nódulos tenham se formado nas raízes de todos os feijões-caupi inoculados e os não inoculados, o desempenho da nodulação varia em resposta às diferentes cepas de *Bradyrhizobium* (Ayalew e Yoseph, 2020). O aumento da ocupação de nódulos leva uma melhor fixação de nitrogênio, necessária para o desenvolvimento da parte aérea nas plantas (Nyaga e Njeru, 2020), o que pode explicar as respostas positivas dos tratamentos contendo isolados rizobianos par altura da planta, número de folhas vivas e massa seca da parte aérea. Além do resultado encontrado nos tratamentos NFB 16A e NFB 16B com déficit hídrico, do qual

apresentam resultados superiores aos demais tratamentos incluindo o adubo nitrogenado e a bactéria comercial, o que mostra uma interação positiva da fixação biológica de nitrogênio promovido por estas bactérias.

Para a produtividade, quanto maior a deficiência hídrica imposta pelos tratamentos, menores são os valores de peso final dos grãos. Souza et al., (2020a) observaram em estudo que o feijão-caupi, ao sofrer déficits cumulativos crescentes a partir de uma lâmina de 50% de ETc, apresentou redução na produtividade atribuída a esse déficit. Esse efeito negativo é explicado pela menor disponibilidade de água para a cultura, o que prejudica o crescimento adequado das plantas, reduzindo a assimilação de carbono devido à menor abertura estomática e, conseqüentemente, afetando os processos fotossintéticos e a produção agrícola (Silva et al. 2017).

Além disso, o déficit hídrico combinado com altas temperaturas tende a diminuir a transpiração da cultura devido à redução na condutância estomática, interferindo na dissipação de calor latente e aumentando a temperatura foliar. Isso compromete a capacidade produtiva das plantas de feijão-caupi, resultando em menor rendimento (Souza et al. 2020). Por outro lado, a introdução de nanotubos de carbono no sistema vegetal pode aumentar significativamente a eficiência metabólica das plantas. Husen e Siddiqi, (2014) demonstraram que esses nanotubos podem melhorar a assimilação de nutrientes e a fotossíntese, levando a um aumento na biomassa e na produção de frutos/grãos. Esses efeitos positivos são atribuídos às alterações nas funções metabólicas proporcionadas pelos nanotubos de carbono, que permitem um crescimento mais robusto e uma maior produtividade, mesmo em condições de estresse hídrico.

## 6.2.ACÚMULO DE MACRO E MICRONUTRIENTES (EXPORTAÇÃO E EXTRAÇÃO)

O resultado alta extração e exportação de nitrogênio pelo tratamento ARB 1,14 pode ser associado a presença da arbolina em sua composição, pois a arbolina é um composto nanotecnológico derivado de uma variedade de resíduos orgânicos, caracterizado por sua

riqueza em carbono orgânico e nitrogênio, essas nanopartículas são capazes de aumentar o metabolismo do nitrogênio (Abdel-Aziz et al., 2019).

A resposta também pode ser explicada, ao observar que o tratamento ARB 1,14 em plena irrigação obteve elevada presença de nodulação, mesmo não apresentando microrganismo em sua composição, demonstrando que esse tratamento possibilitou uma interação benéfica com esse microrganismo presente no solo. Muindi et al. (2021) relata que isolados de rizóbios indígenas podem se mostrar superioridade em desempenho.

Biofertilizantes compostos por bactérias rizobianas e de vida livre promovem o crescimento das plantas, melhoram a produtividade e melhora a solubilização dos minerais (P, K, F, Zn) (Zambrano-Mendoza et al., 2021). Estudos já demonstram que biofertilizantes que contendo microrganismo favorecem melhores resposta na biomassa, crescimento da planta e rendimento de grãos. Farnia e Ghorbani (2014), constatou aumento na biomassa e rendimento de grãos em feijão vermelho ao adicionar bactérias fixadoras na composição de nanofertilizantes. Biofertilizante contendo *Bradyrhizobium* e *Streptomyces griseoflavus* foi eficaz em variáveis de rendimento de feijão mungo, feijão-caupi (Htwe et al., 2019).

A interação entre os Nanopartículas de Carbono (CNPs) e as plantas pode desencadear uma série de efeitos fisiológicos, os quais variam de acordo com as condições de estresse às quais as plantas estão submetidas. Essas alterações são influenciadas pelas características intrínsecas dos CNPs, tais como forma, tamanho, dose, capacidade de resposta, cobertura superficial, classe e características químicas. O problema mais confuso é determinar a concentração perfeita de ser aplicado na planta (Abdel-Aziz, Hasaneen, e Omer 2019). E o efeito dessa interação, seja ele benéfico ou prejudicial, está diretamente ligado à concentração dos CNPs. Além disso, a eficácia das diferentes formas de CNPs varia de acordo com a espécie vegetal envolvida (Alluqmani e Alabdallah, 2022). O que pode explicar a eficiência o ARB 1,14 se destacar em relação aos demais tratamentos contendo carbono no presente estudo.

Os resultados para extração e exportação do presente estudo foram superiores aos por Salama et al. (2021) ao utilizar de fertilizante nanocompósito ecologicamente correto para feijoeiro à base de nanopartículas de carbono. O ARB1,14 promoveu maior absorção de

potássio. Essa maior absorção de potássio permitiu um melhor ajuste osmótico favorecendo a abertura dos estômatos, pela condutância estomática (Tab. 3) em resposta a presença de sais na água, que estava na faixa tolerável para feijão-caupi. Desta forma, o feijão-caupi pode ter aumentou a acumulação de íons  $K^+$  para facilitar a translocação de fotoassimilados e proteger os cloroplastos, sustentando assim a fotossíntese e a sobrevivência da planta (Cakmak, 2005). Teores de íon  $K^+$  nas folhas do feijão-caupi foram superiores sob condições de menor disponibilidade hídrica, em estudo realizado por Pereira Filho et al. (2018), o que pode explicar o resultado positivos do ARB 1,14 na condição de déficit hídrico.

A plantas regulam cuidadosamente a absorção e o transporte de íons, especialmente de  $Na^+$  e  $K^+$ , a fim de manter níveis equilibrados de íons dentro das células (Guo et al., 2023). O que pode afetar o crescimento das plantas como regulação do crescimento das plantas através da bioestimulação, conforme indicado pela maior absorção de K neste estudo. Observa-se que o tratamento ARB 1,14 obteve uma maior extração e importação de Zn, estudo demonstram que o Zn é um micronutriente que pode ser usado para aumentar a eficiência do uso de N pela planta, agindo como inibidores de nitrificação para reduzir as taxas de transformação de N em óxido nitroso ou nitrato e, assim, diminuir a perda de N para a atmosfera ou águas superficiais (Dimkpa et al., 2017). Os CNPs promovem a absorção e acumulação de nutrientes, aumentando assim a eficiência do fertilizante, o que finalmente melhora a qualidade da planta (Shekhawat et al., 2021b), o que pode explicar o resultado do tratamento ARB 1,14.

A utilização de nanopartículas acumula maiores açúcares solúveis totais, especialmente nos estágios de floração e formação de vagens para mitigar o estresse osmótico, como foi comprovado em estudo realizados por utilizando como tratamentos com Nano partículas de fosfato de cálcio (Nasrallah et al., 2022). Os minerais presentes nas sementes ou folhas das plantas desempenham papéis importantes na alteração do metabolismo das plantas, o que afeta o crescimento das plantas, rendimento e qualidade. No presente estudo, especulamos que o conteúdo de N, P e K nas folhas e grãos apresentaram aumento significativo pelo tratamento ARB 1,14 podendo ser atribuída a sua elevada capacidade de retenção de água e biomassa, bem como a liberação lenta de nutrientes, que por sua vez possivelmente afeta a saúde da planta, aumentando assim o rendimento e a qualidade das culturas (Salama et al., 2021).

### 6.3. EFICIÊNCIA NO USO DA ÁGUA

Os indicadores econômicos da água fornecem informações úteis aos agricultores que enfrentam uma escassez crescente de recursos e custos crescentes de água, além de responderem de forma mais eficiente para os decisores políticos encarregados de promover a irrigação e, ao mesmo tempo, preservar o ambiente (Expósito e Berbel, 2017). A produtividade da água (WP) indica o rendimento da colheita por unidade de água consumida pela cultura (Allen et al., 1998). A eficácia do uso da água é considerada um indicador da eficácia com que uma planta utiliza a água (Wang et al., 2023). Embora os tratamentos em plena irrigação tenham produzidos em o dobro em média para cada tratamento aplicado na com déficit hídrico, a diferença na eficiência do uso da água do feijão-caupi em ambas as condições pode ter ocorrido porque, ao longo da fase reprodutiva, o teor de água do solo no tratamento com déficit hídrico de acordo com a ETc permaneceu dentro do limite de água facilmente disponível. O que pode ter permitido que os estômatos permanecessem abertos mesmo na presença de um leve déficit hídrico, como mostra os resultados presente na (Tab. 2). Observa-se que o feijão-caupi reduz sua eficiência no uso da água quando sujeito a condições hídricas limitadas, indicando ajuste para tolerar à falta de água. Isso corrobora outros resultados que demonstram uma estratégia em algumas plantas para utilizar a água de forma eficiente, a fim de aumentar sua produção (Lima et al., 2016).

Estudos ressaltam que o feijão-caupi tem a capacidade notável de preservar seu potencial hídrico foliar (Wu et al., 2008) e teor relativo de água (Anyia, 2004) mesmo sob condições de déficit hídrico acumulado, uma característica também observada no feijão comum por (Guimarães et al., 2006). Essa capacidade sugere que a cultura atua de forma conservadora, priorizando a manutenção de seu estado hídrico, mesmo à custa da atividade fotossintética, corroborando com a redução da eficiência no uso da água (WUE) na presença de déficit hídrico (Souza et al., 2019). A irrigação deficitária pode aumentar a eficiência do uso da água e manter elevando os lucros quando há escassez de água (Wang et al., 2023).

O emprego da água de irrigação na produção agrícola pode ser altamente vantajoso economicamente, especialmente quando se trata do cultivo do feijão-caupi. Investir em uma lâmina de irrigação mais generosa pode resultar em retornos financeiros crescentes. Pesquisas,

como a conduzida por Carvalho et al. (2023), evidenciam que o tratamento com 100% da evapotranspiração de referência (ETc) para o feijão-caupi apresenta as maiores taxas de rentabilidade ao longo de dois anos de estudo.

#### 6.4. INDICADORES ECONÔMICOS

O custo total de produção é calculado com o somatório do custo fixo e variável, que foi de R\$: 12,128,39 esse resultado corrobora com o estudo realizado por Çetin e Uygan (2008) em um estudo utilizando sistema de gotejamento em tomateiro. Contudo, foram inferiores ao encontrado por Lima et al. (2016) que encontraram custos R\$ 16.682,3 para um sistema com redução hídrica de 30% e R\$: 27. 796, 84 para um sistema com redução hídrica 90% para cultivo de pimenta. Um fator que favoreceu o custo total foi o valor reduzido do preço da tarifa elétrica da unidade consumidora do Grupo B em área rural definido pela ANEEL, associado ao sistema pressurizado encontrado no presente estudo. O custo total de fornecimento de energia às explorações agrícolas deve ser avaliado ao considerar a economia proporcionada pela irrigação utilizando um sistema pressurizado, como a irrigação por gotejamento. Nesse contexto, o valor econômico da água é crucial, assim, qualquer água economizada com o uso da irrigação por gotejamento pode ser tratada como um ganho (Çetin e Kara 2019). Esse ganho econômico inclui a análise Receita Bruta, Receita Líquida e Custo-benefício e do custo de produção de grãos em um ciclo para os dois sistemas. Custo benefício e o Custo de produção de grãos de um ciclo para os dois sistemas hídrico apresentaram respostas negativas para o ciclo, no entanto, com quatro ciclos esses resultados como observados na Receita Líquida e Custo-benefício foram positivos, e podem ser encontrados no primeiro ano de lavoura do feijão-caupi, considerando que houve um aumento de 82% entre o ciclo um e o ciclo quatro.

No vigésimo ciclo, os resultados são positivos, devolvendo ao produtor todo o dinheiro investido, o que é considerado a metade da vida útil do sistema de irrigação. O resultado também se deve ao sistema de irrigação empregado, por ser um sistema localizado, que opera com baixa pressão e vazão, é provável que resulte em valores reduzidos do custo do fator água (Lima Junior et al., 2011). Para o presente estudo, não foi considerado o preço do fertilizante nitrogenado, o que elevaria o valor das despesas de implantação da cultura considerando o preço

de mercado de ureia que corresponde R\$ 245,00 o saco com 50kg, e que a necessidade da cultura de 80kg por hectares, o que não ocasionou diferença significativa para o fertilizante nitrogenado do ARB 1,14 no déficit hídrico. Logo, a aplicação do ARB 1,14 é uma alternativa mais viável economicamente pelo seu baixo custo de aquisição.

Os biofertilizantes tem um custo-benefício por ser um produto econômico que economiza dinheiro, ao mesmo tempo que beneficia o meio ambiente e aumenta a produtividade (Kannan e Moorthy, 2022). Outro fator importante que impacta no custo total é o preço do feijão, que no presente estudo realizou-se um levantamento de informações e constatou o preço de R\$: 4,00 o kg nas piores condições de preço. O preço do feijão-caupi depende muito da localidade, e do ano de plantio. Castro Júnior et al. (2015) encontrou uma variação de preço R\$: 2,10 a 3,05 kg em um estudo no estado do Maranhão. O preço de receita líquida e bruta é influenciado diretamente pelo valor do preço de mercado do feijão-caupi, Araújo (2018), que encontrou valores que corroboram com o presente estudo, contudo, os valores foram inferiores decorrente do preço escolhido que foi de R\$: 2,50 abaixo do valor escolhido do presente estudo que foi de R\$ 4,00 kg.

Vale ressaltar que o preço estimado do presente estudo, foi estimado abaixo do preço coletado pelos agricultores, com o objetivo de obter os resultados dentro do pior estado de preço de mercado. Foi realizado um levantamento com os produtores da região para entender como estava a comercialização do preço do feijão-caupi seco. Quando seco, é vendido na forma de saca de 60kg, o preço da saca é de R\$: 350,00 a R\$ 400,00 dependendo da época do ano, logo 60 kg dividido por R\$: 350,00 o valor unitário fica R\$: 5,83 kg.

O custo total pode ser reduzido ao considerar uma agricultura familiar que dispense o valor da mão de obra, ou a participação em cooperativas e associações que possibilite o uso do trator com valor irrisório. Ao analisar os indicadores de eficiência econômica evidenciou que o sistema de produção de feijão-caupi com plena irrigação e déficit hídrico na região semiárida de Pernambuco a partir de quatro ciclos apresentou resultados viáveis do ponto de vista econômico com o produtor obtendo expressiva rentabilidade. Considerando o período, que geralmente compreende doze meses, ou seja, da implantação do primeiro ciclo à comercialização, o produtor de feijão-caupi com plena irrigação obteve rentabilidade. A análise

dos indicadores financeiros também demonstra a viabilidade da exploração do feijão-caupi na região estudada, com todos os índices analisados registrando valores positivos e desempenho notável do valor presente líquido.

Para as condições experimentais e a cultivar adotada, recomenda-se o uso do ARB 1,14 em lâmina de 50% para produtores que não tenha vasto recurso hídrico para o cultivo do feijão-caupi, pois, embora tenha diferido estatisticamente da lâmina de 100%, a diferença média é superior a encontrada para o controle em condições de déficit hídrico no presente estudo.

## 7. CONCLUSÕES

A combinação do tratamento ARB 1,14 em plena irrigação, tem melhor efeito na altura de planta, área foliar, massa seca total, massa seca da parte aérea e produtividade do feijão-caupi. Resultados promissores também foram encontrados na lâmina com déficit hídrico para as variáveis de massa seca total e produtividade, para condutância estomática.

Ao analisar o efeito nutricional dos tratamentos, o ARB 1,14 juntamente com os tratamentos NFB 16A e NFB 16BP apresentaram serem uma boa opção na absorção de nitrogênio. O tratamento ARB 1,14 apresentou uma eficiência extração e exportação de nitrogênio e fósforo, em sistema com plena irrigação, poderia ser uma escolha preferível como biofertilizante com nanopartículas podendo substituir fertilizantes químicos convencionais, por este biofertilizante, não apenas melhora aspectos biométricos, mas também melhora eficiência, por ser mais econômico e ambientalmente sustentável, tem melhor desempenho da colheita, e economia de viabilidade econômica hídrica, sendo uma fonte alternativa de adubação.

Os resultados demonstram que a existência de isolados nativos com potencial para serem desenvolvidos como biofertilizantes utilizando nanopartículas carbonáceas de baixo custo para a produção sustentável de feijão-caupi.

Estudos podem ser desenvolvidos testando novas composições do biofertilizante ARB 1,14 adicionando diferentes isolados rizobianos, ou a aplicação dos fertilizantes com novos teores de diluição.

## REFERÊNCIAS

- ABD, F. K.; ALKURTANY, A. E. S. Evaluation of Biofertilizers Prepared from Local Bacterial Isolates in the Growth and Yield of Cowpea in Gypsiferous Soil. IOP Conference Series: **Earth and Environmental Science**, v. 1252, n. 1, p. 012072, 2023.
- ABDEL-AZIZ, H. M. M.; HASANEEN, M. N. A.; OMER, A. M. Nano chitosan-NPK fertilizer enhances the growth and productivity of wheat plants grown in sandy soil. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 14, n. 1, p. e0902, 2016.
- ABDEL-AZIZ, H. M. M.; HASANEEN, M. N. A.; OMER, A. M. Impact of engineered nanomaterials either alone or loaded with NPK on growth and productivity of French bean plants: Seed priming vs foliar application. **South African Journal of Botany**, v. 125, p. 102–108, 2019.
- ABDEL-GHANY, M. M. N.; ABDEL-AZIZ, H. M. M.; OMER, A. M. Effect of foliar application of engineered nanomaterials: carbon nanotubes NPK and chitosan nanoparticles NPK fertilizer on the growth of French bean plant. **Biochemistry and Biotechnology Research**, v. 4, p. 68–76, 2016.
- ABDELSALAM, N. R. et al. Effect of foliar application of NPK nanoparticle fertilization on yield and genotoxicity in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Science of The Total Environment**, v. 653, p. 1128–1139, 2019.
- ABEBE, T. G. et al. Growing Use and Impacts of Chemical Fertilizers and Assessing Alternative Organic Fertilizer Sources in Ethiopia. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2022, p. 1–14, 2022.
- ALCÂNTARA, L. R. P. et al. Computational modeling of the hydrological processes in caatinga and pasture areas in the brazilian semi-arid. **Water (Switzerland)**, v. 13, n. 13, 2021.
- ALI, S. et al. Biochar soil amendment on alleviation of drought and salt stress in plants: a critical review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 14, p. 12700–12712, 2017.
- ALIYU, O. M. et al. Understanding the Nexus of Genotype, Root Nodulation, and Soil Nutrients for Shoot Biomass Production and Seed Yield in Cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp). **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 2023.
- ALLEN, R. et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO ed. Rome: **Report modeling and application**, 1998.

ALLUQMANI, S. M.; ALABDALLAH, N. M. The Effect of Thermally Heated Carbon Nanoparticles of Oil Fly Ash on Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Under Salt Stress. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 4, p. 5123–5132, 2022.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ÁLVAREZ-ARAGÓN, R.; PALACIOS, J. M.; RAMÍREZ-PARRA, E. Rhizobial symbiosis promotes drought tolerance in *Vicia sativa* and *Pisum sativum*. **Environmental and Experimental Botany**, v. 208, 2023.

ANYIA, A. Water-use efficiency, leaf area and leaf gas exchange of cowpeas under mid-season drought. **European Journal of Agronomy**, v. 20, n. 4, p. 327–339, 2004.

ARAÚJO, J. L. P. Caracterização e avaliação econômica do feijão-caupi na mesorregião Sudeste Piauiense. Em: TÔSTO, S. G. et al. (Eds.). **Caracterização e Avaliação Econômica de Sistemas de Produção e Cultivo de grãos em Biomas Brasileiros**. 1. ed. Campinas-SP: Embrapa Territorial, 2018. v. 248p. 69–83.

ASHFAQ, M.; VERMA, N.; KHAN, S. Carbon nanofibers as a micronutrient carrier in plants: efficient translocation and controlled release of Cu nanoparticles. **Environmental Science: Nano**, v. 4, n. 1, p. 138–148, 2017.

AURAS, N. É. et al. **Recomendação do uso de estirpes fixadoras de nitrogênio em leguminosas de importância florestal**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Agrobiologia Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento: V. Seropédica, RJ. 2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/186065/1/recomendacao-de-uso-de-estirpes-fixadoras.pdf>. Acesso: 15 de jan, 2024.

AVELLAN, A. et al. Critical Review: Role of Inorganic Nanoparticle Properties on Their Foliar Uptake and *in Planta* Translocation. **Environmental Science & Technology**, v. 55, n. 20, p. 13417–13431, 2021.

AYALEW, T.; YOSEPH, T. Symbiotic effectiveness of inoculation with *Bradyrhizobium* isolates on Cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) varieties. **Cogent Food & Agriculture**, v. 6, n. 1, p. 1845495, 2020.

BASHIR, A. et al. Combined use of zinc nanoparticles and co-composted biochar enhanced wheat growth and decreased Cd concentration in grains under Cd and drought stress: A field study. **Environmental Technology & Innovation**, v. 23, p. 101518, 2021.

BOHLOOL, B. B. et al. Biological nitrogen fixation for sustainable agriculture: A perspective. **Plant and Soil**, v. 141, n. 1–2, p. 1–11, 1992.

BREMNER, J. M.; MULVANEY, C. S. Nitrogen total. Em: **Methods of soil analysis. Part 2. Madison: American Society of Agronomy**. A. L. Page, p. 595–624. 1982.

CAKMAK, I. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 168, n. 4, p. 521–530, 2005.

CAKMAK, I.; STRABAC, D.; MARSCHNER, H. Activities of Hydrogen Peroxide-Scavenging Enzymes in Germinating Wheat Seeds. **Journal of Experimental Botany**, v. 44, n. 1, p. 127–132, 1993.

CARVALHO, E. DE O. T. DE et al. Economic indicators for cowpea cultivation under different irrigation depths. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, n. 8, p. 618–624, 2023.

CASTRO JÚNIOR, W. L. et al. Viabilidade econômica de tecnologias de manejo da irrigação na produção do feijão-caupi, na região dos cocais-MA. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 3, p. 406–418, jun. 2015.

ÇETIN, O.; KARA, A. Assesment of water productivity using different drip irrigation systems for cotton. **Agricultural Water Management**, v. 223, p. 105693, 2019.

ÇETIN, Ö.; UYGAN, D. The effect of drip line spacing, irrigation regimes and planting geometries of tomato on yield, irrigation water use efficiency and net return. **Agricultural Water Management**, v. 95, n. 8, p. 949–958, 2008.

CHANDRASHEKAR, H. K. et al. Nanoparticle-mediated amelioration of drought stress in plants: a systematic review. **3 Biotech**, v. 13, n. 10, p. 336, 2023.

CONAB, C. N. DE A. **A cultura do feijão**. 1. ed. Brasília - DF: Conab, 2018a.

CONAB, C. N. DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Brasília: Conab, 2018b. v. 5

CÓRDOVA-TAPIA, F.; ZAMBRANO, L. Functional diversity in community ecology. **Ecosistemas**, v. 24, n. 3, p. 78–87, 22 dez. 2015.

DAVIES-BARNARD, T.; FRIEDLINGSTEIN, P. The Global Distribution of Biological Nitrogen Fixation in Terrestrial Natural Ecosystems. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 34, n. 3, 2020.

DIMKPA, C. O. et al. Nanoparticle and Ionic Zn Promote Nutrient Loading of Sorghum Grain under Low NPK Fertilization. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 65, n. 39, p. 8552–8559, 2017.

EMBRAPA, E. B. DE P. AGROPECUÁRIA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília. Embrapa Solos/Embrapa Informática Agropecuária/Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999.

EMBRAPA. **Fixação biológica de nitrogênio - perguntas e respostas**. Embrapa, Brasília, 2024. Acessado em 14 fev. 2024. Online. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-fixacao-biologica-de-nitrogenio/perguntas-erespostas>. Acessado 15 abr, 2023.

EXPÓSITO, A.; BERBEL, J. Agricultural Irrigation Water Use in a Closed Basin and the Impacts on Water Productivity: The Case of the Guadalquivir River Basin (Southern Spain). **Water**, v. 9, n. 2, p. 136, 2017.

FARIAS, P. I. V. et al. Input assurance for Brazilian food production Written by Food assurance **Food assurance**. p. 52–54, 2021.

FARNIA, A.; GHORBANI, A. Effect of K Nano-fertilizer and N Bio-fertilizer on yield and yield components of red bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **International Journal of Biosciences (IJB)**, v. 5, n. 12, p. 296–303, 2014.

FATIMA, F.; HASHIM, A.; ANEES, S. Efficacy of nanoparticles as nanofertilizer production: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 2, p. 1292–1303, 17 jan. 2021.

FERNANDES, A. L. T.; SANTINATO, R.; FERNANDES, D. R. **Irrigação na cultura do café**. 2. ed. Uberaba: O Lutador, 2008.

FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006.

FERNÁNDEZ, J. E. et al. Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: A case study of a super high density olive tree orchard. **Agricultural Water Management**, v. 237, p. 106074, 2020.

FREIRE FILHO, F. R. **Feijão-Caupi no Brasil Produção, melhoramento genético, avanços e desafios**. Teresina-PI: Embrapa Meio-Norte, 2011.

FREIRE FILHO, F. R.; COSTA, A. F. Feijão-Caupi: Classificação botânica e importância. Em: COSTA, A. F. (Ed.). **Feijão-caupi no semiárido brasileiro riquezas e oportunidades integração e fortalecimento**. Recife-PE: UFRPE, 2020. p. 17–20.

FREITAS, A. D. S. et al. Fixação biológica de nitrogênio no Semiárido Brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia física**, v. 8, 2015.

FRIZZONE, J. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S. **Planejamento de irrigação: análise de decisão de investimento**. Brasília: EMBRAPA, 2005.

GALINDO, F. S. et al. Technical and economic viability of cowpea co-inoculated with *Azospirillum brasilense* and *Bradyrhizobium* spp. and nitrogen doses. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 5, p. 304–311, 2020.

GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. **Superoxide Dismutases**. **Plant Physiology**, v. 59, n. 2, p. 309–314, 1977.

GONZÁLEZ-ALCARAZ, M. N. et al. Gradients of soil salinity and moisture, and plant distribution, in a Mediterranean semiarid saline watershed: A model of soil-plant relationships for contributing to the management. **Catena**, v. 115, p. 150–158, abr. 2014.

GOYAL, V. et al. Unlocking the Potential of Nano-Enabled Precision Agriculture for Efficient and Sustainable Farming. **Plants**, v. 12, n. 21, p. 3744, 1 nov. 2023.

GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; BRUNINI, O. Adaptação do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) à seca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 70–75, 2006.

GUO, H. et al. Photosynthesis, Water Status and K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> Homeostasis of *Buchoe dactyloides* Responding to Salinity. **Plants**, v. 12, n. 13, p. 2459, 2023.

HARIKRISHNAN, A. et al. Eco-friendly synthesis of zinc oxide nanoparticles (ZnOnps) from *Piper betel* leaf extract: spectral characterization and its application on plant growth parameters in maize, fenugreek and red gram. **Materials Technology**, v. 39, n. 1, 2024.

HAVIR, E. A.; MCHALE, N. A. Biochemical and Developmental Characterization of Multiple Forms of Catalase in Tobacco Leaves. **Plant Physiology**, v. 84, n. 2, p. 450–455, 1987.

HENRIQUE, J. C. G. DE S. et al. Nitrogen and molybdenum fertilization influence on enzymatic activity and productivity enhancement of forage sorghum under water deficit in the Brazilian semi-arid region. **Journal of Plant Nutrition**, p. 1–28, 2024.

HTWE, A. Z. et al. Effects of Biofertilizer Produced from *Bradyrhizobium* and *Streptomyces griseoflavus* on Plant Growth, Nodulation, Nitrogen Fixation, Nutrient Uptake, and Seed Yield of Mung Bean, Cowpea, and Soybean. **Agronomy**, v. 9, n. 2, p. 77, 2019.

CUNHA, M.; CAMPO, R. J. **Fixação biológica no Brasil é exemplo de sucesso**. Visão Agrícola, Piracicaba, p. 27 - 30, 2006.

HUSEN, A.; SIDDIQI, K. Carbon and fullerene nanomaterials in plant system. **Journal of Nanobiotechnology**, v. 12, n. 1, p. 16, 2014.

KANNAN, R.; MOORTHY, T. S. Cost-Benefit Assessment of Solid-Based Biofertilizer Production. Em: Amaresan, N., Dharumadurai, D., Babalola, O.O. (eds) **Agricultural Microbiology Based Entrepreneurship**. Microorganisms for Sustainability, vol 39. Springer, Singapore. p. 329–339, 2023.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Avibook, 1990.

KUILA, D.; GHOSH, S. Aspects, problems and utilization of Arbuscular Mycorrhizal (AM) application as bio-fertilizer in sustainable agriculture. **Current Research in Microbial Sciences**, v. 3, p. 100107, 2022.

LATEEF, A. et al. Evaluation of feather hydrolysate-mediated silver nanoparticles as biofertilizers for the enhancement of vegetative growth and nutraceutical properties of vegetables. **Nanotechnology for Environmental Engineering**, v. 9, n. 1, p. 47–65, 15 mar. 2024.

- LI, S. et al. Role of Hydraulic Signal and ABA in Decrease of Leaf Stomatal and Mesophyll Conductance in Soil Drought-Stressed Tomato. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, 2021.
- LIMA JUNIOR, J. A. DE et al. Economical evaluation of the crisphead lettuce production as a function of irrigation depths 1. **Ciênc. agrotec**, v. 35, n. 2, p. 392–398, 2011.
- LIMA, V. M. et al. Viabilidade econômica da produção de pimentinha-verde submetida a diferentes lâminas de irrigação. *Revista de Ciências Agrárias - Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, v. 59, n. 4, p. 326–332, 2016.
- LOWRY, G. V.; AVELLAN, A.; GILBERTSON, L. M. Opportunities and challenges for nanotechnology in the agri-tech revolution. **Nature Nanotechnology**, v. 14, n. 6, p. 517–522, 5 jun. 2019.
- MA, J. et al. Modeling symbiotic biological nitrogen fixation in grain legumes globally with LPJ-GUESS (v4.0, r10285). **Geoscientific Model Development**, v. 15, n. 2, p. 815–839, 2022.
- MAÇIK, M.; GRYTA, A.; FRAÇ, M. Biofertilizers in agriculture: An overview on concepts, strategies and effects on soil microorganisms. Em: **Academic Press**. Editor(s): DONALD L. S. v.162, p. 31–87. 2020.
- MAHANTY, T. et al. Biofertilizers: a potential approach for sustainable agriculture development. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 4, p. 3315–3335, 26 fev. 2017.
- MARINHO, R. DE C. N. et al. Symbiotic and agronomic efficiency of new cowpea rhizobia from Brazilian semi-arid. **Bragantia**, v. 76, n. 2, p. 273–281, 2017.
- MÁRQUEZ-PRIETO, A. K. et al. Impact of the foliar application of potassium nanofertilizer on biomass, yield, nitrogen assimilation and photosynthetic activity in green beans. **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**, v. 50, n. 1, p. 12569, 25 fev. 2022.
- MEDEIROS, E. V. et al. Diversidade morfológica de rizóbios isolados de caupi cultivado em solos do estado do rio grande do norte. *Acta Scientiarum - Agronomy*, v. 31, n. 3, p. 529–535, 2009.
- MELO, S. R. DE; ZILLI, J. É. Fixação biológica de nitrogênio em cultivares de feijão-caupi recomendadas para o Estado de Roraima. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 9, p. 1177–1183, 2009.
- MENDONÇA, F. C. Evolução dos custos e avaliação econômica de sistemas de irrigação utilizados na cafeicultura. In: SANTOS, C. M. et al. **Irrigação da cafeicultura no cerrado**. Uberlândia: Editora da UFU, p. 45-78. 2021.
- MIELCARZ-SKALSKA, L.; SMOLIŃSKA, B.; WŁODARCZYK, K. Nanoparticles as Potential Improvement for Conventional Fertilisation in the Cultivation of *Raphanus sativus* var. *sativus*. **Agriculture**, v. 11, n. 11, p. 1067, 2021.

- MOGALE, E. T. et al. Biological Nitrogen Fixation of Cowpea in a No-Till Intercrop under Contrasting Rainfed Agro-Ecological Environments. **Sustainability**, v. 15, n. 3, p. 2244, 2023.
- MOREIRA, F. S. M.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do Solo**. 2<sup>o</sup> ed. Lavras-MG: UFLA, 2006.
- MUINDI, M. M. et al. Symbiotic efficiency and genetic characterization of rhizobia and non rhizobial endophytes associated with cowpea grown in semi-arid tropics of Kenya. **Heliyon**, v. 7, n. 4, p. e06867, 2021.
- NADEEM, S. et al. Preparation of carbon nanoparticles constructed from seed Oils, physical characterizations and antifungal performance. **Inorganic Chemistry Communications**, v. 159, p. 111774, 2024.
- NAKANO, Y.; ASADA, K. Hydrogen Peroxide is Scavenged by Ascorbate-specific Peroxidase in Spinach Chloroplasts. **Plant and Cell Physiology**, v. 22, n. 5, p. 867–880, 1981.
- NASRALLAH, A. K. et al. Mitigation of Salinity Stress Effects on Broad Bean Productivity Using Calcium Phosphate Nanoparticles Application. **Horticulturae**, v. 8, n. 1, p. 75, 2022.
- NAVARRO, J. M.; MORTE, A. Arbuscular Mycorrhizal Fungi as Biofertilizers to Increase the Plant Quality of Sour-Orange Seedlings. **Agronomy**, v. 14, n. 1, p. 230, 2024.
- NEPAL, J. et al. Carbon nanomaterials are a superior soil amendment for sandy soils than biochar based on impacts on lettuce growth, physiology and soil biochemical quality. **NanoImpact**, v. 31, p. 100480, 2023.
- 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, 2020.
- OLIVEIRA, A. P. DE et al. Avaliação de linhagens e cultivares de feijão-caupi, em Areia, PB. **Horticultura Brasileira**, v. 20, n. 2, p. 180–182, 2002.
- OLIVEIRA, M. P.; MALAGOLLI, G. A.; CELLA, D. MERCADO DE FERTILIZANTES: dependência de importações do Brasil. **Revista Interface Tecnológica**. v. 16, n. 1, p. 489–498, 2019.
- OYEKANMI, A. A. et al. Development of nanoparticles loaded composites from agricultural wastes for cationic dye removal from aqueous solution – A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 5, p. 108263, 2022.
- PAHALVI, H. N. et al. Chemical Fertilizers and Their Impact on Soil Health. Em: Microbiota and Biofertilizers, Vol 2. Cham: **Springer International Publishing**. p. 1–20. 2021.
- PANDEY, K. et al. Effects of carbon-based nanomaterials on seed germination, biomass accumulation and salt stress response of bioenergy crops. **PLOS ONE**, v. 13, n. 8, p. e0202274, 2018.

PEREIRA FILHO, J. V. et al. ACÚMULO DE SOLUTOS INORGÂNICOS DO FEIJÃO CAUPI IRRIGADO SOB ESTRESSE SALINO E HÍDRICO. **IRRIGA**, v. 1, n. 2, p. 1–5, 2018.

PEREIRA, S. et al. Co-inoculation with rhizobia and mycorrhizal fungi increases yield and crude protein content of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) under drought stress. **Landbauforschung**, v. 70, n. 2, p. 56–65, 2020.

PINTO, D. B. B. et al. Recovery of Bradyrhizobium cells and effects on the physiological quality of soybean seeds sown in dry soil. **Journal of Seed Science**, v. 45, 2023.

RAHMAN, K.; ZHANG, D. Effects of Fertilizer Broadcasting on the Excessive Use of Inorganic Fertilizers and Environmental Sustainability. **Sustainability**, v. 10, n. 3, p. 759, 2018.

RANA, K. L. et al. Endophytic nitrogen-fixing bacteria: Untapped treasurer for agricultural sustainability. **Journal of Applied Biology and Biotechnology Open Science Publishers LLP Inc.** 2023.

RIBEIRO, V. Q. et al. Ciclo fenológico em caupi (*Vigna unguiculata* L.Walp.): uma proposta de escala de desenvolvimento. **Revista Científica Rural**, Bage, RS, v.5, n.2, p.110-116, 2000.

ROCHA, D. F. DA et al. Desempenho do feijão-caupi a densidades de plantas na região Norte da Bahia. **Agropecuária Técnica**, v. 40, n. 3–4, p. 48–54, 2019.

RUFINI, M. et al. Symbiotic efficiency and identification of rhizobia that nodulate cowpea in a Rhodic Eutrudox. **Biology and Fertility of Soils**, v. 50, n. 1, p. 115–122, 2014.

SALAMA, D. M. et al. Synthesis of an eco-friendly nanocomposite fertilizer for common bean based on carbon nanoparticles from agricultural waste biochar. **Pedosphere**, v. 31, n. 6, p. 923–933, 2021.

SAVCI, S. Investigation of Effect of Chemical Fertilizers on Environment. **APCBEE Procedia**, v. 1, p. 287–292, 2012.

SAE- Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos. **Produção nacional de fertilizantes: Estudo estratégico. Desenvolvimento econômico.** SAE-PR. 2020. Disponível em: [https://www.gov.br/planalto/pt-br/assuntos/assuntos-estrategicos/documentos/estudos-estrategicos/sae\\_publicacao\\_fertilizantes\\_v10.pdf](https://www.gov.br/planalto/pt-br/assuntos/assuntos-estrategicos/documentos/estudos-estrategicos/sae_publicacao_fertilizantes_v10.pdf). Acessado: 19 jun. 2024.

SHAH, Z. M. et al. Incorporation of zinc sulfide nanoparticles, *Acinetobacter pittii* and *Bacillus velezensis* to improve tomato plant growth, biochemical attributes and resistance against *Rhizoctonia solani*. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 202, p. 107909, set. 2023.

SHEKHAWAT, G. S. et al. Role of Engineered Carbon Nanoparticles (CNPs) in Promoting Growth and Metabolism of *Vigna radiata* (L.) Wilczek: Insights into the Biochemical and Physiological Responses. **Plants**, v. 10, n. 7, p. 1317, 2021a.

SHEKHAWAT, G. S. et al. Role of Engineered Carbon Nanoparticles (CNPs) in Promoting Growth and Metabolism of *Vigna radiata* (L.) Wilczek: Insights into the Biochemical and Physiological Responses. **Plants**, v. 10, n. 7, p. 1317, 2021b.

Suhag, M. Potential of biofertilizers to replace chemical fertilizers. *Internacional Av. Res. J. Ciência. Eng. Technology*. 3, 163–167. 2016.

SILVA, L. S. et al. Physical properties of grains of cowpea genotypes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, n. 3, p. 216–222, 2023.

SILVA, T. G. F. et al. Soil water dynamics and evapotranspiration of forage cactus clones under rainfed conditions. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 7, p. 515–525, 2015.

SILVA, W. C. et al. Growth and gas exchange in cowpea plants under different managements and saline conditions. **REVISTA CIÊNCIA AGRONÔMICA**, v. 48, n. 5, p. 756–764, 2017.

SOBRAL, L. F. et al. **Guia Prático para Interpretação de Resultados de Análises de Solo**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Tabuleiros Costeiros Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento Documentos 206. p 13, Embrapa ed. 2015.

SOUMARE, A. et al. Exploiting Biological Nitrogen Fixation: A Route Towards a Sustainable Agriculture. **Plants**, v. 9, n. 8, p. 1011, 2020.

SOUSA, D. DE P. et al. Performance of Cowpea under Different Water Regimes in Amazonian Conditions. **Horticulturae**, v. 8, n. 4, p. 335, 2022.

SOUSA, M. F. DA C. **INTERFERÊNCIA DE PLANTAS DANINHAS ASSOCIADAS A RESTRIÇÃO HÍDRICA NO CRESCIMENTO INICIAL DO FEIJÃO-CAUPI** (*Vigna unguiculata* (L.). Dissertação—Manaus – AM: UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM, 2019.

SOUZA, A. C. D. M. et al. Biological nitrogen fixation stability of cowpea cultivars with tropical semi-arid rhizobial strains. **Revista Caatinga**, v. 34, n. 2, p. 359–369, 10 maio 2021.

SOUZA, L. DE P. et al. Produtividade e indução de enzimas antioxidantes em Feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) irrigado com água salina e Inoculado com *Bradyrhizobium*. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 5, p. e50511528433, 2022.

SOUZA, P. J. O. P. et al. Yield and water use efficiency of cowpea under water deficit. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 2, p. 119–125, fev. 2019.

SOUZA, P. J. O. P. et al. Yield gap in cowpea plants as function of water déficits during reproductive stage. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 6, p. 372–378, 2020.

TAYOH, L. N. Destruction of Soil Health and Risk of Food Contamination by Application of Chemical Fertilizer. Em: *Ecological and Practical Applications for Sustainable Agriculture*. Singapore: **Springer Singapore**, 2020. p. 53–64.

- TEIXEIRA, C. P. et al. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Embrapa ed. Brasília, DF. v. 3 p. 574, 2017.
- TELLES, T. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Economic value of biological nitrogen fixation in soybean crops in Brazil. **Environmental Technology & Innovation**, v. 31, p. 103158, ago. 2023.
- THOMAS, R. L.; SHEARD, R. W.; MOYER, J. R. Comparison of conventional and automated procedures for nitrogen, phosphorus and potassium analysis of plant material using a single digest. **Agronomy journal**, v. 59, p. 240–243, 1967.
- WANG, J. et al. Azolla (*Azolla pinnata*) Mitigated Water Stress and Enhanced Fruit Yield of Mango Plants (*Mangifera indica* L.) in Arid-degraded Soil. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, n. 1, p. 1173–1184, 2023.
- WANG, P. et al. Nanotechnology: A New Opportunity in Plant Sciences. **Trends in Plant Science**, v. 21, n. 8, p. 699–712, 2016.
- WU, F. et al. Effects of drought stress and N supply on the growth, biomass partitioning and water-use efficiency of *Sophora davidii* seedlings. **Environmental and Experimental Botany**, v. 63, n. 1–3, p. 248–255, 2008.
- XIN, X. et al. Carbon nanoparticles improve corn (*Zea mays* L.) growth and soil quality: Comparison of foliar spray and soil drench application. **Journal of Cleaner Production**, v. 363, p. 132630, 2022.
- ZAMBRANO-MENDOZA, J. L. et al. Use of Biofertilizers in Agricultural Production. Em: Technology in Agriculture. **IntechOpen**, 2021.
- ZAYED, M. et al. Effect of Nano Chitosan on Growth, Physiological and Biochemical Parameters of *Phaseolus vulgaris* under Salt Stress. **Journal of Plant Production**, v. 8, n. 5, p. 577–585, 2017.
- ZHAO, Z. et al. Carbon Nanoparticles Promoted the Absorption of Potassium Ions by Tobacco Roots via Regulation of K<sup>+</sup> Flux and Ion Channel Gene Expression. **Current Nanoscience**, v. 20, n. 3, p. 390–398, 2024.
- ZULKARNAIN. Augmenting Sustainable Agricultural Land with Bio-fertilizers to Boost Food Production in Kalimantan, Indonesia. **Pakistan Journal of Life and Social Sciences (PJLSS)**, v. 21, n. 2, 2023.