

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE MESTRADO**

**BIOINSUMOS E NITROGÊNIO NA PROMOÇÃO DO
CRESCIMENTO DAS CULTURAS DO SORGO E DA MANDIOCA**

Daniele Oliveira Cunha

**CRUZ DAS ALMAS - BAHIA
JULHO – 2025**

BIOINSUMOS E NITROGÊNIO NA PROMOÇÃO DO CRESCIMENTO DA CULTURAS DO SORGO E DA MANDIOCA

Daniele Oliveira Cunha
Engenheira Agrônoma, UFRB, 2023

Dissertação apresentada ao Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Ciências Agrárias (Área de Concentração: Agricultura Tropical).

Orientadora: Rafaela Simão Abrahão Nóbrega
Coorientador: Patrícia Lopes Leal

**CRUZ DAS ALMAS – BAHIA
JULHO – 2025**

FICHA CATALOGRÁFICA

C972b

Cunha, Daniele Oliveira.

Bioinsumos e nitrogênio na promoção do crescimento das culturas do sorgo e da mandioca / Daniele Oliveira Cunha. – Cruz das Almas, BA, 2025.

117f.; il.

(Dissertação) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias Ambientais e Biológicas, Mestrado em Ciências Agrárias.

Orientadora: Prof. Dra. Rafaela Simão Abrahão Nóbrega.

Coorientadora: Prof. Dra. Patrícia Lopes Leal.

1.Adubação – Nitrogênio na agricultura. 2.Sorgo – Mandioca – Cultivo. 3.Crescimento – Manejo – Análise. I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias Ambientais e Biológicas. II.Título.

CDD: 631.81


Ficha elaborada pela Biblioteca Central da UFRB. Responsável pela
Elaboração Antonio Marcos Sarmento das Chagas (Bibliotecário - CRB5 / 1615).

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE MESTRADO**


**BIOINSUMOS E NITROGÊNIO NA PROMOÇÃO DO
CRESCIMENTO DAS CULTURAS DO SORGO E DA MANDIOCA**

Comissão Examinadora da Defesa de Dissertação de
Daniele Oliveira Cunha


Aprovada em 31 de julho de 2025

Documento assinado digitalmente
 **RAFAELA SIMAO ABRAHAO NOBREGA**
Data: 30/09/2025 10:22:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Rafaela Simão Abrahão Nóbrega
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB
Orientadora

Documento assinado digitalmente
 **TOSHIK IARLEY DA SILVA**
Data: 30/09/2025 16:03:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Toshik Iarley da Silva
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB
Examinador Interno

Documento assinado digitalmente
 **VALDINETE VIEIRA NUNES**
Data: 30/09/2025 17:28:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Valdinete Vieira Nunes
Universidade Federal de Sergipe
Examinadora Externa

DEDICATÓRIA

À minha mãe, Maria da Glória, aos meus irmãos, ao meu esposo Rafael e a toda a minha família, por seu apoio incondicional, amor infinito e cuidado incansável. Sou profundamente grata por compreenderem minha ausência em tantos momentos e, mesmo assim, continuarem ao meu lado, me apoiando a cada passo desta jornada, com a certeza de que tudo que busco é um futuro melhor para todos nós.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar ao meu bom Deus, pela vida, por todas as oportunidades que me foram concedidas, por ter me guiado por bons caminhos até aqui.

À minha mãe, Maria da Glória, pelo amor e cuidado incondicionais, e por ter feito de tudo para que este sonho se realizasse, mesmo frente a todas as dificuldades. Aqui estão os resultados dos seus esforços.

A minha irmã Kátia, por acreditar em mim e no meu potencial. E à minha irmã Bruna (*in memoriam*), grande inspiração para minha jornada.

Aos meus queridos avós (*in memoriam*), tios e primos por todo acolhimento e carinho.

Ao meu esposo, Rafael, pelo amor, paciência e compreensão inabaláveis ao longo dessa caminhada.

À Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias pela oportunidade.

Às minhas amigas, Andreza Correia e Raissa Gonçalves, que estiveram comigo nas alegrias e adversidades e foram a minha maior conquista durante a pós-graduação. Obrigada por tornarem essa jornada mais leve e afetuosa.

A Dra. Caliane Braulio, pelas contribuições para o enriquecimento do meu trabalho.

Aos membros do Laboratório de Biologia do Solo - UFRB, em especial Damiana e Larissa.

Aos funcionários do Bloco L, Bloco Q, Prédio de Solos e Fazenda Experimental do CCAAB pelo suporte fundamental ao longo dessa jornada.

Aos meus colegas de turma 2023.2, em especial Camila, Denise e Leiliane.

Ao Dr. Eder Jorge de Oliveira e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária- EMBRAPA Mandioca e Fruticultura pela cessão dos genótipos de mandioca para realização da pesquisa.

Ao professor Dr. Toshik Iarley, Dra. Valdinete Nunes, Dra. Franceli da Silva, pelas valiosas contribuições.

Ao professor Dr. Ossival Lolato, pelo apoio.

A minha orientadora, Profa. Dra. Rafaela Simão Abrahão Nóbrega, pelos conhecimentos compartilhados, orientação e apoio.

A minha coorientadora Dra. Patrícia Leal e ao Dr. Elismar Oliveira, pelas contribuições.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa, essencial ao desenvolvimento deste projeto.

EPIGRAFE

Conheça todas as teorias, domine todas as técnicas, mas ao tocar uma alma humana, seja apenas outra alma humana (Carl Jung).

BIOINSUMOS E NITROGÊNIO NA PROMOÇÃO DO CRESCIMENTO DAS CULTURAS DO SORGO E DA MANDIOCA

RESUMO GERAL

As bactérias promotoras do crescimento vegetal podem atuar não só na fixação biológica de nitrogênio, mas também na produção de fitohormônios e sideróforos, solubilização de fosfato e controle biológico de fitopatógenos. Esses benefícios não se restringem às culturas leguminosas e contribuem para a redução da necessidade de adubação nitrogenada e crescimento de culturas não leguminosas. Nesse contexto, o presente trabalho foi dividido em três capítulos tendo como objetivos: i) realizar uma revisão bibliométrica e sistemática acerca do uso de bactérias promotoras de crescimento vegetal (BPCV) na cultura do sorgo; ii) avaliar o efeito das inoculações de UFRB FA72A2-1 (*Bacillus cereus*) e de UFRB FA34C2-2 (*Achromobacter spanius*) associadas à adubação nitrogenada convencional no crescimento do sorgo; e iii) avaliar o efeito de UFRB FA72A2-1 e UFRB FA34C2-2 no crescimento inicial de genótipos de mandioca. O efeito das inoculações associadas à adubação nitrogenada convencional foi avaliado em dois experimentos (solo estéril e não estéril) nos quais foram testadas cinco doses de nitrogênio (0, 30, 60, 90 e 120 kg ha⁻¹) juntamente com a inoculação de *B. cereus* e *A. spanius* e uma testemunha sem inoculação. Foram mensurados altura das plantas, diâmetro do colmo, índices de clorofila, teores de N, P e K na parte aérea, massa seca da parte aérea e raízes e realizadas análises químico-bromatológicas, bem como características morfogênicas (solo estéril). No terceiro capítulo o objetivo foi avaliar o efeito de UFRB FA72A2-1 e UFRB FA34C2-2 no crescimento inicial de genótipos de mandioca. Foram testadas combinações entre genótipos e as estirpes bacterianas, além de duas testemunhas sem inoculação (0 e 40 kg ha⁻¹ de N). Foram mensurados altura de planta, diâmetro do caule, número de folhas, índices de clorofila e massas secas da parte aérea e das raízes. A análise bibliométrica indicou um aumento nas pesquisas sobre PGPB no cultivo do sorgo entre 2014 e 2024 e os principais focos de pesquisa foram os efeitos das PGPB no crescimento e fixação biológica de nitrogênio e o uso dessas bactérias na mitigação de estresses abióticos. A adubação nitrogenada, especialmente doses entre 90 e 120 kg ha⁻¹ de N, favoreceu as variáveis índice de clorofila, massa seca de folhas verdes e nos teores de nitrogênio e proteína bruta, em ambos os experimentos. As estirpes não apresentaram efeito relevante na promoção do crescimento do sorgo nas condições experimentais avaliadas. No ensaio com mandioca o genótipo BR 11-34-64 apresentou as maiores médias de diâmetro do colmo, número de folhas, massa seca da parte aérea e também dos índices de clorofila, especialmente quando inoculado com as estirpes UFRB FA72A2-1 e UFRB FA34C2-2. O trabalho amplia o conhecimento sobre bactérias promotoras de crescimento em sorgo e mandioca reforçando a importância de novas investigações para práticas agrícolas mais sustentáveis.

Palavras-chave: Adubação nitrogenada, *Achromobacter spanius*, inoculantes, *Sorghum bicolor*, *Bacillus cereus*, *Manihot esculenta*.

BIO-INPUTS AND NITROGEN IN PROMOTING THE GROWTH OF SORGHUM AND CASSAVA CROPS

GENERAL ABSTRACT

Plant growth-promoting bacteria can act not only in biological nitrogen fixation, but also in the production of phytohormones and siderophores, phosphate solubilization, and biological control of phytopathogens. These benefits are not restricted to leguminous crops and contribute to reducing the need for nitrogen fertilization and the growth of non-leguminous crops. In this context, the present study was divided into three chapters with the following objectives: i) to conduct a bibliometric and systematic review of the use of plant growth-promoting bacteria (PGPB) in sorghum cultivation; ii) to evaluate the effect of inoculations of UFRB FA72A2-1 (*Bacillus cereus*) and UFRB FA34C2-2 (*Achromobacter spanius*) associated with conventional nitrogen fertilization on sorghum growth; and iii) to evaluate the effect of UFRB FA72A2-1 and UFRB FA34C2-2 on the initial growth of cassava genotypes. The effect of inoculations associated with conventional nitrogen fertilization was evaluated in two experiments (sterile and non-sterile soil) in which five doses of nitrogen (0, 30, 60, 90, and 120 kg ha⁻¹) were tested together with inoculation of *B. cereus* and *A. spanius* and a control without inoculation. Plant height, culm diameter, chlorophyll indices, N, P, and K contents in the aerial part, dry mass of the aerial part and roots were measured, and chemical-bromatological analyses were performed, as well as morphogenic characteristics (sterile soil). In the third chapter, the objective was to evaluate the effect of UFRB FA72A2-1 and UFRB FA34C2-2 on the initial growth of cassava genotypes. Combinations between genotypes and bacterial strains were tested, in addition to two controls without inoculation (0 and 40 kg ha⁻¹ of N). Plant height, stem diameter, number of leaves, chlorophyll indices, and dry masses of the aerial part and roots were measured. Bibliometric analysis indicated an increase in research on PGPB in sorghum cultivation between 2014 and 2024, with the main research focuses being the effects of PGPB on growth and biological nitrogen fixation and the use of these bacteria in mitigating abiotic stresses. Nitrogen fertilization, especially doses between 90 and 120 kg ha⁻¹ of N, favored the variables chlorophyll index, dry mass of green leaves, and nitrogen and crude protein contents in both experiments. The strains did not have a significant effect on promoting sorghum growth under the experimental conditions evaluated. In the cassava trial, the BR 11-34-64 genotype showed the highest means for culm diameter, number of leaves, dry mass of the aerial part, and chlorophyll indices, especially when inoculated with strains UFRB FA72A2-1 and UFRB FA34C2-2. The study expands knowledge about growth-promoting bacteria in sorghum and cassava, reinforcing the importance of further research for more sustainable agricultural practices.

Keywords: Nitrogen fertilization, *Achromobacter spanius*, inoculants, *Sorghum bicolor*, *Bacillus cereus*, *Manihot esculenta*.

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1. Mecanismos de promoção de crescimento em *Sorghum bicolor* por meio da inoculação de bactérias.....49

Tabela 2. Aplicação de PGPB em *Sorghum bicolor* submetido ao estresse abiótico.....55

CAPÍTULO 2

Tabela 1. Teores de fósforo (P) e potássio (K) (%) da parte aérea de plantas de sorgo cultivado em solo estéril em função das estirpes de bactérias UFRB FA72A2-1, UFRB FA34C2-2 e controle sem inoculação. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si (Teste Tukey, $p < 0,05$).....82

CAPÍTULO 3

Tabela 1. Médias de diâmetro de caule (DC), número de folhas (NF) e massa seca da parte aérea (MSPA) em mudas de mandioca, aos 45 dias após o plantio, em função dos genótipos.....108

Tabela 2. Número de folhas (NF) de mudas de mandioca, aos 45 dias após o plantio, em função das fontes de nitrogênio.....108

Tabela 3. Desdobramento da interação entre os genótipos e as fontes de nitrogênio para a altura das plantas (ALT), índice de clorofila a (CLA), índice de clorofila b (CLB), índice de clorofila total (CLT) e massa seca de raiz (MSR) em mudas de mandioca, aos 45 dias após o plantio.....109

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

- Figura 1.** Fluxograma de triagem e seleção dos dados.....38
- Figura 2.** Produção científica anual em pesquisa sobre uso de BPGP no cultivo de *Sorghum bicolor* de 2014 a 2024.....39
- Figura 3.** (A) Distribuição geográfica de publicações científicas e colaboração de países na área de pesquisas em uso de BPGP no cultivo de *Sorghum bicolor* (B); Crescimento das publicações dos cinco principais países produtores de pesquisa sobre uso de BPGP no cultivo de *Sorghum bicolor*.....40
- Figura 4.** (A) Os 10 periódicos mais produtivos em pesquisa sobre uso de PGPB em *Sorghum bicolor*. (B) Os 10 periódicos mais citados em pesquisa sobre uso de PGPB em *Sorghum bicolor*.....41
- Figura 5.** (A) As 10 publicações mais citadas globalmente sobre o uso de BPGP no cultivo de *Sorghum bicolor*.....42
- Figura 6.** Nuvem de palavras-chaves mais frequentes nos estudos sobre uso de PGPB no cultivo de *Sorghum bicolor*.....43
- Figura 7.** Mapa de rede para termos com pelo menos uma ocorrência nas palavras-chaves dos estudos sobre uso de PGPB no cultivo de *Sorghum bicolor*.....43
- Figura 8.** Mapa temático que relaciona o grau de relevância e o nível de desenvolvimento dos temas de pesquisa mais explorados em relação ao uso de PGPB no cultivo de *Sorghum bicolor*.....45

CAPÍTULO 2

- Figura 1.** Índice de clorofila *a*, *b* e total em plantas de sorgo cultivado em solo estéril em função de doses de nitrogênio (kg ha^{-1}). ** Significativo ($p < 0,01$), segundo o teste *F*80
- Figura 2.** Massa seca de material morto de plantas de sorgo cultivado em solo estéril em função de doses de nitrogênio (kg ha^{-1}). ** Significativo ($p < 0,01$), segundo o teste *F*.....80
- Figura 3.** Massa seca de folha verde (g por planta) de plantas de sorgo cultivadas em solo estéril, em função da interação entre as estirpes UFRB FA72A2-1, UFRB FA34C2-2 e o controle sem inoculação, e doses de nitrogênio (kg ha^{-1}). Médias seguidas pela mesma letra minúscula dentro de cada dose de nitrogênio não

diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). * Significativo ($p < 0,05$), segundo o teste F.....81

Figura 4. (A) Teor de nitrogênio de plantas de sorgo cultivado em solo estéril em função de doses de nitrogênio (kg ha^{-1}). * Significativo ($p < 0,05$), segundo o teste t (B) Proteína bruta de plantas de sorgo em função de doses de nitrogênio (kg ha^{-1}). * Significativo ($p < 0,05$), segundo o teste F.....82

Figura 5. Índice de clorofila a , b e total em plantas de sorgo em função de doses de nitrogênio (kg ha^{-1}). ** Significativo ($p < 0,01$), segundo o teste F.....83

Figura 6. Altura de plantas de sorgo (cm) em função de doses de nitrogênio (kg ha^{-1}) ** Significativo ($p < 0,01$), segundo o teste F.....84

Figura 7. (A) Massa seca de folhas verdes de plantas de sorgo em função de doses de nitrogênio (kg ha^{-1}). ** Significativo ($p < 0,01$), segundo o teste t (B) Massa seca de folhas verdes (g planta^{-1}) de plantas de sorgo em função da inoculação com estirpes de bactérias UFRB FA72A2-1, UFRB FA34C2-2 e controle sem inoculação. Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre si (Teste Tukey, $p < 0,05$)84

Figura 8. Massa seca de panícula de plantas de sorgo em função de doses de nitrogênio (kg ha^{-1}). ** Significativo ($p < 0,01$), segundo o teste F.....85

Figura 9. Massa seca de raiz de plantas de sorgo em função da interação entre as estirpes UFRB FA72A2-1 e UFRB FA34C2-2 e controle sem inoculação, e doses de nitrogênio (kg ha^{-1}). Médias seguidas pela mesma letra minúscula dentro de cada dose de nitrogênio não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). * Significativo ($p < 0,05$), segundo o teste F.....86

Figura 10. Taxa de alongamento de colmo de plantas de sorgo em função de doses de nitrogênio (kg ha^{-1}). ** Significativo ($p < 0,01$), segundo teste F.....86

Figura 11. Duração de vida das folhas de plantas de sorgo em função de doses de nitrogênio (kg ha^{-1}). ** Significativo ($p < 0,01$), segundo teste F.....87

Figura 12. (A) Teor de nitrogênio de plantas de sorgo em função de doses de nitrogênio (kg ha^{-1}). ** Significativo ($p < 0,01$), segundo o teste t (B) Proteína bruta de plantas de sorgo em função de doses de nitrogênio (kg ha^{-1}). ** Significativo ($p < 0,01$), segundo o teste F.....87

SUMÁRIO

1.0	INTRODUÇÃO GERAL.....	14
2.0	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1	Fixação biológica de nitrogênio e promoção de crescimento vegetal de plantas não- leguminosas.....	16
2.2	Fatores que influenciam a eficiência da fixação biológica de nitrogênio (FBN).....	18
2.3	A cultura do sorgo [<i>Sorghum bicolor</i> (L.)Moench].....	19
2.4	A cultura da mandioca (<i>Manihot esculenta</i> Crantz).....	21
3.0	REFERÊNCIAS.....	23
	CAPÍTULO 1 – Avanços científicos no uso de PGPB para o cultivo de sorgo: uma análise bibliométrica e sistemática.....	32
	RESUMO.....	33
	ABSTRACT.....	34
1.	INTRODUÇÃO.....	35
2.	MATERIAL E MÉTODOS.....	37
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.	CONCLUSÕES.....	63
5.	REFERÊNCIAS.....	64
	CAPÍTULO 2 – Estratégias para otimizar o crescimento do <i>Sorghum bicolor</i>: bactérias benéficas e adubação nitrogenada em Latossolo Amarelo Distrocoeso.....	71
	RESUMO.....	72
	ABSTRACT.....	73
1.	INTRODUÇÃO.....	74
2.	MATERIAL E MÉTODOS.....	75
2.1	Experimentos.....	77
2.2	Avaliações morfológicas e fisiológicas	77
2.3	Análises estatística.....	79
3.	RESULTADOS	79
4.	DISCUSSÃO.....	88
5.	CONCLUSÕES.....	92
6.	REFERÊNCIAS.....	93
	CAPÍTULO 3 – Crescimento inicial de genótipos de mandioca inoculados com bactérias promotoras de crescimento.....	100
	RESUMO.....	101
	ABSTRACT.....	102
1.	INTRODUÇÃO.....	103
2.	METODOLOGIA.....	104
2.1	Avaliações morfológicas e fisiológicas	106
2.2	Análise estatística.....	106
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	106
5.	CONCLUSÕES.....	113
6.	REFERÊNCIAS.....	114

1. INTRODUÇÃO GERAL

A crescente pressão sobre os recursos naturais exige transformações nos sistemas agrícolas, com foco na sustentabilidade e na diversificação das culturas. Nesse contexto, faz-se necessário adotar estratégias que conciliam produtividade e conservação ambiental, com menor dependência de insumos químicos e maior resiliência às mudanças climáticas. A diversificação dos cultivos, associada ao manejo sustentável do solo e ao uso de bioinsumos, contribui para a segurança alimentar e a manutenção da fertilidade, o que favorece sistemas produtivos mais equilibrados (TAMBURINI et al., 2020). Entre as práticas amplamente adotadas para elevar a produtividade, destaca-se a melhoria da fertilidade do solo (AGBOWURO; AYEYO; EMECHO, 2021), que, integrada a abordagens agroecológicas, potencializa resultados de forma sustentável.

Os fertilizantes nitrogenados são fundamentais nesse contexto, pois o nitrogênio é um dos nutrientes essenciais para maximizar a produtividade das culturas (BASSI; MENOSSI; MATTIELO, 2018). Contudo, o uso intensivo desses fertilizantes está associado a altos custos energéticos e a impactos ambientais negativos (CARVALHO et al., 2014), como emissões de gases de efeito estufa, acidificação do solo, esgotamento de recursos não renováveis e lixiviação de nitratos, que contamina águas superficiais e subterrâneas, resultando em consequências graves, como a eutrofização (MAHMUD et al., 2020; AASFAR et al., 2021).

Diante desses desafios, cresce o interesse por alternativas sustentáveis, como a utilização de bactérias promotoras de crescimento vegetal (PGPB). Esses microrganismos vêm sendo fonte de estudos em diversas culturas, tais como: sorgo (BARROS et al., 2020), milho (OLIVEIRA et al. 2024), feijão-caupi (COSTA et al., 2016), cana-de-açúcar (OLIVEIRA et al., 2003), mandioca (DIOGO et al., 2023), apresentando resultados importantes no crescimento e produção. As PGPB podem atuar melhorando o desenvolvimento das culturas por meio de mecanismos diretos de promoção do crescimento, como a fixação biológica de nitrogênio (FBN) (SANTOS et al., 2017), produção de sideróforos (CEN et al., 2024), ACC desaminase (GUPTA; PANDEY, 2019) e fitohormônios como auxinas, giberelinas (UMAPATHI et al., 2024) e citocininas (MEKUREYAW et al., 2022), solubilização

do fosfato (SOUSA, 2017), além de mecanismos indiretos como biocontrole de fitopatógenos (BRAULIO, 2023), absorção de nutrientes (CHENG et al., 2025) e tolerância a estresses abióticos (EL-MEIHY et al., 2019, UMAPATHI et al., 2024).

A seleção de novas PGPB é uma estratégia para a otimização da fixação biológica de nitrogênio e promoção do crescimento vegetal, especialmente em função da especificidade das interações entre microrganismos e hospedeiros, bem como da influência determinante do ambiente de cultivo sobre a eficácia dessas associações. Nesse contexto, é fundamental realizar estudos que avaliem cultivos em solos estéreis e não estéreis, tanto na presença quanto na ausência de adubação nitrogenada, com o objetivo de compreender a interação mais eficiente entre isolados, genótipos e ambiente para beneficiar as culturas agrícolas.

Na literatura ainda não há informações a respeito de qual seria o efeito da inoculação das estirpes UFRB FA72A2-1 (*Bacillus cereus*) e UFRB FA34C2-2 (*Achromobacter spanius*), isolado de uma área com histórico de manipueira no cultivo do sorgo. Neste sentido faz-se necessário avaliar o potencial dessas cepas na promoção de crescimento das culturas nas condições edafoclimáticas do Recôncavo Baiano.

A dissertação encontra-se dividida em três capítulos, que serão apresentados na forma de artigos científicos. O primeiro capítulo é composto por uma revisão bibliométrica sobre o uso de bactérias promotoras de crescimento no cultivo de sorgo (*Sorghum bicolor*). Essa revisão analisa a produção científica relacionada ao uso de PGPB no cultivo de sorgo entre 2014 e 2024, a fim de relatar os avanços obtidos na área, identificar lacunas de conhecimento e destacar os principais focos de investigação para fornecer subsídios para estudos futuros. O segundo capítulo analisa os efeitos da inoculação das estirpes UFRB FA72A2-1 (*Bacillus cereus*) e UFRB FA34C2-2 (*Achromobacter spanius*) no cultivo do sorgo, associadas a doses de nitrogênio. Já o terceiro capítulo avalia o impacto dessas mesmas estirpes no crescimento inicial de quatro genótipos de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Fixação biológica de nitrogênio e promoção de crescimento vegetal de plantas não-leguminosas

O nitrogênio (N) é um dos nutrientes essenciais para o crescimento e desenvolvimento das plantas, representando aproximadamente 2% da matéria seca total das mesmas (CARVALHO et al., 2014; SANTI; BOGUSZ; FRANCHE, 2013). Contudo, as plantas não conseguem absorver diretamente o gás nitrogênio, que é predominante na atmosfera (KABANGE et al., 2022). Para que o nitrogênio atmosférico se torne biologicamente acessível, ele deve ser convertido de sua forma gasosa inerte (N_2) para amônia (NH_3), possibilitando sua incorporação em diversos compostos bioquímicos essenciais (CHANWAY; ANAND; YANG, 2014). Esse processo, conhecido como fixação biológica de nitrogênio (FBN), é realizado através de um complexo enzimático chamado nitrogenase, encontrado exclusivamente em alguns microrganismos procarióticos, denominados diazotróficos (FREITAS et al., 2015; MOREIRA; SIQUEIRA, 2006; AASFAR et al., 2021).

Os diazotróficos incluem uma ampla variedade de microrganismos procarióticos, abrangendo arqueobactérias, cianobactérias e bactérias tanto gram-positivas quanto gram-negativas. Esses microrganismos apresentam grande diversidade em características morfológicas, fisiológicas, genéticas e filogenéticas (MOREIRA et al., 2010).

A interação mais bem estudada entre bactérias diazotróficas e plantas são aquelas que envolvem leguminosas e bactérias fixadoras de nitrogênio do gênero *Rhizobium*, que estabelecem uma relação simbiótica ao formarem nódulos nas raízes de leguminosas, sendo a bactéria um endossimbionte. A função predominante do nódulo é produzir um ambiente propício à fixação bacteriana de N (CARVALHO, et al., 2014). No entanto, os diazotróficos também podem ser de vida livre ou estar associados a outras espécies vegetais (MOREIRA et al., 2010).

As diazotróficas associativas colonizam as raízes sem formar nódulos e podem ser endofíticas facultativas, quando colonizam tanto interna quanto externamente as raízes ou as endofíticas obrigatórias, que colonizam o interior das raízes e os tecidos aéreos das plantas, promovendo o crescimento da planta hospedeira sem causar patogenicidade (VIDEIRA; ARAÚJO; BALDANI, 2007;

VIEIRA, 2017).

Além da fixação de nitrogênio, as bactérias diazotróficas associativas podem ser consideradas rizobactérias promotoras do crescimento vegetal (IMRAN et al., 2021). Entre elas, as cepas dos gêneros *Azospirillum* (NAKAO et al., 2018), *Bacillus* (FRETES et al., 2021), *Enterobacter* (HEIJO et al., 2021), *Herbaspirillum* (SCHLEMPER et al., 2018), *Pseudomonas* (AMORA-LAZCANO et al., 2022), *Klebsiella* (BOECHAT et al., 2020), *Burkholderia* (WU, et al. 2019), *Stenotrophomonas* (ANTUNES et al., 2019), *Agrobacterium* (SANTANA et al., 2020), *Paenibacillus* (AQUINO et al., 2022) são frequentemente mencionadas como potenciais promotoras de crescimento.

Essa promoção de crescimento está relacionada a mecanismos diretos como a estimulação da fixação de N, solubilização e disponibilização de nutrientes como ferro, enxofre e fosfatos inorgânicos e insolúveis, biossíntese de fitohormônios (auxinas, giberelinas e citocininas) (SILVA et al., 2020; HAKIM et al., 2020). Indiretamente, as bactérias mitigam os estresses abióticos e bióticos, atuando no controle de fitopatógenos por meio da produção de exopolissacarídeos, sideróforos, quitinases, glucanases e antibióticos (VIEIRA, 2017, AASFAR et al., 2021).

Embora a simbiose rizóbio-leguminosa seja a interação mais estudada, algumas plantas da família Poaceae têm mostrado potencial de associação com diazotróficos, como é o caso da cana-de-açúcar, milho, arroz, trigo, sorgo, dentre outras (RODRÍGUEZ; SICARDI; FRIONI, 2015; CHAVES et al., 2015; LIU et al., 2019; NASCENTE et al., 2019; AQUINO et al., 2019). Além disso, bactérias diazotróficas associam-se a plantas de tubérculo, como batata-doce e mandioca (FERNANDES et al., 2023).

Moreira e Siqueira (2006) destacam que a eficiência das bactérias associativas não se iguala àquela observada na simbiose entre rizóbios e leguminosas, devido à ausência de uma relação tão complexa e organizada. Avanços mais recentes reforçam a relevância desse grupo para os sistemas agrícolas. Hungria et al. (2022), por meio de um conjunto de 30 ensaios de campo realizados ao longo de uma década, demonstraram a viabilidade de substituir até 25% do fertilizante nitrogenado de cobertura pela inoculação de sementes de milho com *Azospirillum brasilense*. Essa estratégia possibilitou recomendar, com

segurança, a redução de 22,5 kg ha⁻¹ de N mineral, além de evitar a emissão de 4,95 milhões de Mg de CO₂-e por ano (HUNGRIA et al., 2022).

No entanto, o estabelecimento de uma interação benéfica planta-bactéria depende de fatores como espécies e genótipos de plantas, linhagens bacterianas e fatores ambientais (THIEBAUT et al., 2022). Dessa forma é importante promover ensaios em culturas não leguminosas, como o sorgo, devido à escassez de pesquisas nesse campo. Esses estudos são fundamentais para reduzir a necessidade de adubação nitrogenada, promovendo assim uma agricultura mais sustentável.

2.2 Fatores que influenciam a eficiência da fixação biológica de nitrogênio (FBN)

A eficiência do processo de fixação biológica de nitrogênio (FBN) é condicionada por uma complexa interação entre fatores bióticos e abióticos. Dentre os fatores edáficos, destacam-se a textura do solo, o pH, a disponibilidade de fósforo e o teor de matéria orgânica. Solos excessivamente ácidos ou alcalinos podem restringir o crescimento de microrganismos simbiotes e comprometer o processo de nodulação (HUNGRIA; CAMPOS; MENDES, 2001). A disponibilidade de fósforo, em particular, é crítica, uma vez que esse nutriente está diretamente envolvido na síntese de ATP, molécula indispensável à atividade da enzima nitrogenase, responsável pela conversão do nitrogênio atmosférico em formas assimiláveis pelas plantas (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Além disso, solos com elevados teores de matéria orgânica tendem a apresentar maior atividade microbiana, favorecendo a colonização radicular e o estabelecimento da simbiose (ESMAEILZADEH; AHANGAR, 2014; BHATTACHARYYA et al., 2022).

Do ponto de vista climático, variáveis como temperatura, umidade do solo e precipitação exercem influência direta sobre a sobrevivência e o metabolismo das bactérias fixadoras. Temperaturas extremas, sejam elevadas ou reduzidas, podem inibir a atividade da nitrogenase (COMPAORÉ; STAL, 2010). A deficiência hídrica, por sua vez, compromete tanto a formação dos nódulos quanto a assimilação do nitrogênio pelas plantas (KIRDA; DANSO; ZAPATA, 1989; DUBEY; SRIVASTAVA; PESSARAKLI, 2021).

No que se refere às plantas hospedeiras, características como espécie,

genótipo e estágio fenológico influenciam diretamente a compatibilidade e a eficiência da simbiose. Genótipos específicos podem apresentar maior afinidade com determinadas estirpes bacterianas, resultando em maior número de nódulos e maior taxa de fixação de nitrogênio (MENDOZA-SUÁREZ et al., 2021).

Por parte das bactérias, a eficiência da FBN está relacionada a fatores como a espécie e estirpe bacteriana, capacidade de adaptação ao ambiente, produção de exopolissacarídeos e competitividade na rizosfera. Estirpes nativas ou previamente adaptadas às condições edafoclimáticas locais tendem a apresentar maior desempenho simbiótico (OLIVEIRA et al., 2020; ACCIOLY et al., 2024; ALI et al., 2024).

Por fim, práticas de manejo agrícola influenciam de forma significativa a eficácia da FBN. A aplicação excessiva de fertilizantes nitrogenados minerais pode reduzir a nodulação e, conseqüentemente, a eficiência da simbiose (ZUFFO et al., 2019). Em contrapartida, estratégias sustentáveis como a rotação de culturas, o uso de biofertilizantes e o cultivo de leguminosa e não-leguminosas associadas à inoculação com estirpes eficientes promovem melhorias na sustentabilidade dos sistemas agrícolas e no rendimento das culturas (SAMMAURIA et al., 2020; XAVIER et al., 2023).

2.3. A cultura do sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]

O sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] é originário da África, considerado uma das espécies cultivadas mais antigas da história e o quinto cereal mais importante do mundo, depois do milho, arroz, trigo e cevada (KHAWAJA et al., 2014; BALAKRISHNA et al., 2019). É uma espécie muito adaptável, cultivada em regiões tropicais, subtropicais e temperadas. Por ser uma planta C₄, é fotossinteticamente eficiente, tolerando tanto a seca quanto o estresse térmico (VENKATESWARAN et al., 2019), que a torna uma cultura importante no combate à fome em meio às mudanças climáticas (KHALIFA; ELTAHIR, 2023).

Trata-se de uma cultura versátil que pode ser cultivada com diversos propósitos como a produção de grãos para alimentação, extração de suco açucarado do caule para a fabricação de xarope, açúcar mascavo ou etanol. Além disso, o bagaço e folhagem verde que podem ser aproveitados para diversas

finalidades, como forragem animal, produção de bioetanol, fertilizante orgânico ou fabricação de papel (KHAWAJA et al., 2014; WANG; UPADHYAYA; DEWEIKAT, 2016).

Isso é possível devido à existência de cinco tipos de cultivares comerciais que podem ser empregados nas diferentes finalidades: produção de grãos (sorgo granífero), produção de massa para silagem (sorgo forrageiro), produção de biomassa lignocelulósica (sorgo lignocelulósico ou sorgo biomassa), produção de etanol (sorgo sacarino) e até mesmo para a fabricação de vassouras (sorgo vassoura) (MAY et al., 2013; KHAWAJA et al., 2014).

Dentre outras vantagens do uso do sorgo destacam-se: alto rendimento de matéria seca em relação a outras gramíneas e possibilidade de utilização de rebrota. Além disso, o sorgo pode ser considerado uma planta com características xerófilas, baixa exigência de fertilidade do solo e resistente/tolerante à seca e à salinidade (PINHO et al., 2015).

O sorgo é uma gramínea anual semelhante à cana, com caules eretos com cerca de 0,5–6 m de altura, monóica, com um a muitos perfilhos originários da base ou dos nós do caule. A espécie é adaptada principalmente às regiões tropicais quentes e semiáridas, mas pode ser cultivada em regiões temperadas. As temperaturas de crescimento de 25–31 °C são ótimas e requer chuvas de 500 a 800 mm durante, além disso, pode ser implantado em uma ampla variedade de solos, com níveis de pH do solo de 5,0 a 8,5 (VENKATESWARAN et al., 2019).

O ciclo de desenvolvimento da cultura é composto por três etapas distintas: a fase vegetativa, a fase reprodutiva e o período de maturação dos grãos. Durante a fase vegetativa (EC1), a plântula emerge e cresce até iniciar a formação da panícula. O estágio de crescimento (EC2) abrange o período que vai desde a formação da panícula até o florescimento, enquanto a última fase (EC3) ocorre do florescimento até a maturação fisiológica dos grãos (MAGALHÃES; DURAES; SCHAFFERT, 2000). O momento e a duração de cada estágio do ciclo da cultura variam dependendo da cultivar, localização, época de plantio e condições sazonais, mas o ciclo geralmente leva entre 90 a 140 dias para ser concluído (VENKATESWARAN et al., 2019).

O sorgo requer uma adequada disponibilidade de nutrientes para alcançar rendimentos satisfatórios. Em solos com fertilidade baixa a moderada, as

necessidades de adubação são de cerca de: 100-150 kg de N, 60-100 kg de P₂O₅ e 60-100 kg de K₂O ha⁻¹. Recomenda-se que a aplicação de nitrogênio seja feita antes da semeadura e 20-30 dias após a emergência (KHAWAJA et al., 2014), visto que nesse período, as plantas entram em um estágio de crescimento acelerado, aumentando significativamente a absorção de nutrientes do solo (RIBAS, 2008).

Segundo Bergamaschi et al. (2007), produtores de sorgo no Brasil enfrentam anualmente despesas significativas com fertilizantes nitrogenados, o que não apenas representa um ônus financeiro, já que a adubação nitrogenada pode ocasionar impactos ambientais. No entanto, o sorgo pode associar-se a bactérias de diversos gêneros, como *Pseudomonas* (DHAWI; DATTA; RAMAKRISHNA, 2017), *Burkholderia*, *Herbaspirillum* e *Enterobacter* (SCHLEMPER et al., 2018; WU, et al. 2019; AQUINO et al., 2021), *Stenotrophomonas*, *Bacillus* (ANTUNES et al., 2019) *Azospirillum* (NAKAO et al., 2018, ANTUNES et al., 2019; SILVA et al., 2024), que proporcionam aumentos na biomassa das raízes e da parte aérea, na área foliar, teor de clorofila, acúmulo de N, bem como no diâmetro do caule e na altura das plantas, através da fixação biológica de nitrogênio e outros mecanismos de promoção de crescimento.

2.4. A cultura da mandioca (*Manihot esculenta* Crantz)

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é um arbusto perene da família Euphorbiaceae nativo da América do Sul. O gênero *Manihot* possui aproximadamente 100 espécies, sendo a mandioca a única cultivada comercialmente, principalmente, por possuir raízes ricas em amido. Possui importância no contexto da segurança alimentar em regiões tropicais, sendo um alimento básico para mais de 800 milhões de pessoas, sobretudo devido ao seu elevado rendimento calórico por hectare, a adaptabilidade a condições de solo inférteis, a relativa resistência a doenças e a flexibilidade do tempo de colheita (NASSAR et al., 2007; LIU et al., 2014; SHIGAKI, 2016; BYJU; SUJA, 2020; PEREIRA et al., 2022).

Comparada a outras fontes de amido, a mandioca oferece uma produção de hidratos de carbono que é aproximadamente 40% superior à do arroz e 25% superior à do milho, tornando-a a fonte mais econômica de calorias tanto para a

nutrição humana quanto para a alimentação animal. A composição típica de suas raízes compreende um teor de umidade de 70%, 24% de amido, 2% de fibras, 1% de proteínas e outras substâncias, incluindo vitaminas e minerais, como zinco, ferro, magnésio, cobre e manganês, que totalizam 3% (TONUKARI, 2004).

Apesar do seu valor nutricional, na alimentação humana e animal, requer um processamento cuidadoso, por conter antinutrientes cianogênicos que a torna potencialmente venenosa. As variedades de mandioca são classificadas em dois tipos: amargo e doce, a depender da quantidade de glicosídeos cianogênicos. As variedades amargas contêm níveis tóxicos de glicosídeos cianogênicos e, portanto, geralmente não são adequadas para consumo humano sem processamento intensivo. Variedades doces contêm níveis relativamente baixos de cianetos e são comestíveis (SHIGAKI, 2016).

Nos países tropicais, a cultura pode ser cultivada desde o nível do mar até cerca de 2000 m acima do nível (HOWELER, 2012). A maior parte da mandioca é cultivada como cultura de sequeiro entre $\pm 30^\circ$ de latitude. As temperaturas médias anuais para o desenvolvimento ótimo da cultura variam de 25 a 29 °C (LIU et al., 2014). A mandioca é uma cultura tolerante à seca e geralmente cultivada onde a precipitação média anual excede 1000 mm e é restrito a solos bem drenados (HOWELER, 2012; COCK; CONNOR, 2021; EL-SHARKAWY, 2007). O pH do solo ideal para a mandioca é 5,5 a 6,5, mas a cultura suporta a acidez do solo e altos níveis de Al (BYJU; SUJA, 2020; BORGES et al., 2021).

Para a propagação vegetativa, as estacas são retiradas de caules lignificados e geralmente têm cerca de 15 a 20 cm de comprimento, obtidas de estacas de plantas sadias com 8 a 15 meses (COCK; CONNOR, 2021; SHIGAKI, 2016). Do plantio à colheita, a mandioca apresenta cinco estágios de desenvolvimento progressivo, ou seja, emergência da brotação (5–15 DAP, dia após o plantio), início do desenvolvimento foliar e formação do sistema radicular, quando se inicia o desenvolvimento de algumas raízes fibrosas (entre 3 a 14) em raízes de armazenamento (15–90 DAP), desenvolvimento de caules e folhas (90–180 DAP), alta translocação de carboidratos das folhas para raízes (180–300 DAP) e dormência (300–360 DAP). De modo geral, o tamanho máximo da copa é atingido em 6 meses após o plantio (COCK, 1984; ALVES, 2002; EL-SHARKAWY, 2004).

Os padrões de distribuição da matéria seca entre os diferentes órgãos da

planta da mandioca mudam acentuadamente durante o ciclo de crescimento, com a parte aérea dominando nos primeiros 6 meses, enquanto as raízes de armazenamento tornam-se o principal sumidouro de fotoassimilados durante o resto do ciclo de crescimento (EL-SHARKAWY, 2004).

Por ser uma planta resistente, é capaz de crescer em solos com baixa concentração de nutrientes; entretanto, seu potencial produtivo se manifesta em solos que apresentam nível de fertilidade adequado. A mandioca absorve quantidades consideráveis de nutrientes, exportando praticamente tudo o que absorve, com uma mínima devolução ao solo na forma de resíduos culturais, dessa forma a calagem e a adubação da mandioca visam repor esses nutrientes. Em média, a produção de 25 toneladas por hectare de raízes e parte aérea de mandioca resulta na extração de 123 kg de N, 27 kg de P, 146 kg de K, 46 kg de Ca e 20 kg de Mg, sendo o N o segundo elemento mais exportado (BORGES et al., 2021).

Considerando a alta exportação de nitrogênio, a cultura da mandioca também pode se beneficiar pela associação a bactérias diazotróficas. Estudos com *Azospirillum brasilense*, relataram aumento da absorção de N em torno 27–40% (FERNANDES et al. 2023), além de melhorias nos caracteres agrônômicos da mandioca (AGUILERA et al., 2022). Além do *Azospirillum*, bactérias do gênero *Bacillus* também promoveram maiores teores de clorofila nas folhas e nitrogênio e fósforo na parte aérea (QUEIRÓS et al., 2024). A associação com *Azospirillum amazonense* (BR 11140), *Herbaspirillum seropedicae* (BR 11175), *Gluconacetobacter diazotrophicus* (BR 11284) *Streptomyces* sp. (S 30) culminou em um teor de proteína bruta similar ao obtido com o nitrogênio mineral, devido à melhoria da nutrição da mandioca por meio de PGPB (LOPES et al., 2019).

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASFAR, A.; BARGAZ, A.; YAAKOUBI, K.; HILALI, A.; BENNIS, I.; ZEROUAL, Y.; KADMIRI, I. M. Nitrogen fixing *Azotobacter* species as potential soil biological enhancers for crop nutrition and yield stability. **Frontiers in Microbiology**, v. 12, p. 628379, 2021.

ACCIOLY, A. A.; PAIVA FARIAS, R.; ARRUDA, E. C. P. Plants in the caatinga possess multiple adaptative leaf morphoanatomical traits concurrently, a pattern

revealed from a systematic review. **Journal of Arid Environments**, v. 222, p. 105162, 2024.

AGBOWURO, G. O.; AYEYO, M. E.; EMECHO, T. S. The use of microbial inoculants in crop production for food security sustainability. **Advanced Journal of Graduate Research**, v. 10, n. 1, p. 33-40, 2021.

AGUILERA, J. G.; KREWER, B. I.; LIMA, R. E.; ZUFFO, A. M.; RATKE, R. F.; JUNIOR, J. A. A.; MARTÍNEZ, L. A. Posição da maniva e aplicação de *Azospirillum brasilense* influenciam caracteres agronômicos da mandioca. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 4, p. e53711427750, 2022

ALI, S.; AKHTAR, M. S.; SIRAJ, M.; ZAMAN, W. Molecular Communication of Microbial Plant Biostimulants in the Rhizosphere Under Abiotic Stress Conditions. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 25, n. 22, p. 12424, 2024.

ALVES, A. A. C. Cassava botany and physiology. In: HILLCOCK, R.; THRESH, J. M.; BELLLOTTI, A. (org.). Cassava: biology, production and utilization. **Wallingford, UK: CABI**, 2002. p. 67–89.

AMORA-LAZCANO, E.; QUIROZ-GONZÁLEZ, H. J.; OSORNIO-ORTEGA, C. I.; CRUZ-MAYA, J. A.; JAN-ROBLERO, J. Plant growth-promoting bacteria belonging to the genera *Pseudomonas* and *Bacillus* improve the growth of sorghum seedlings in a low-nutrient soil. **Botanical Sciences**, v. 100, n. 1, p. 55-66, 2022.

ANTUNES, G. R.; SANTANA, S. R. A.; ESCOBAR, I. E. C.; BRASIL, M. S.; ARAÚJO, G. G. L.; VOLTOLINI, T. V.; FERNANDES-JUNIOR, P. I. Associative diazotrophic bacteria from forage grasses in the Brazilian semi-arid region are effective plant growth promoters. **Crop and Pasture Science**, v. 70, n. 10, p. 899-907, 2019.

AQUINO, J. P. A.; MACEDO JUNIOR, F. B.; ANTUNES, J. E. L.; FIGUEREDO, M. V. B.; NETO, F. A.; ARAUJO, A. S. F. Plant growth-promoting bacteria increase the yield of green maize and sweet sorghum. **Journal of Plant Nutrition**, v. 46, n. 1, p. 58-68, 2022.

AQUINO, J. P. A.; SILVA, J. R. A.; OLIVEIRA, R. P.; FREITAS, M. S. M.; SANTOS, C. E. R.; ALMEIDA, A. Q. Plant growth-promoting bacteria improve growth and nitrogen metabolism in maize and sorghum. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 33, n. 3, p. 249–260, 2021.

AQUINO, J. P. A.; SILVA, J. R. A.; OLIVEIRA, R. P.; FREITAS, M. S. M.; SANTOS, C. E. R.; ALMEIDA, A. Q. Plant growth-promoting endophytic bacteria on maize and sorghum. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 49, p. e56241, 2019.

BALAKRISHNA, D.; KRISHNA, M. L.; KUMAR, A. Tissue culture and genetic transformation in *Sorghum bicolor*. In: Breeding sorghum for diverse end uses. Woodhead Publishing, 2019. p. 115-130.

BARROS, B. G. F.; SILVA, J. A. A.; CAVALCANTE, V. A.; SANTOS, L. R.; REIS, V. M.; XAVIER, G. R.; RUMJANEK, N. G. Biological nitrogen fixation in field-grown

sorghum under different edaphoclimatic conditions is confirmed by N isotopic signatures. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 117, p. 93-101, 2020.

BASSI, D.; MENOSSE, M.; MATTIELLO, L. Nitrogen supply influences photosynthesis establishment along the sugarcane leaf. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 2327, 2018.

BERGAMASCHI, C.; SANTOS, C. E. R.; OLIVEIRA, R. P.; FREITAS, M. S. M.; AQUINO, J. P. A.; ALMEIDA, A. Q. Ocorrência de bactérias diazotróficas associadas a cultivares de sorgo forrageiro. **Ciência Rural**, v. 37, p. 727–733, 2007.

BHATTACHARYYA, S. S.; ROS, G. H.; FURTAK, K.; IQBAL, H. M.; PARRA-SALDÍVAR, R. Soil carbon sequestration – An interplay between soil microbial community and soil organic matter dynamics. **Science of the Total Environment**, v. 815, 152928, 2022.

BOECHAT, C. L.; MOREIRA, I. T. A.; OLIVEIRA, J. A.; GOMES, J. C.; PEREIRA, E. G. Bioaugmentation-assisted phytoremediation of As, Cd, and Pb using *Sorghum bicolor* in a contaminated soil of an abandoned gold ore processing plant. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, p. e0200081, 2020.

BORGES, A. L.; SILVA, J. D.; SOUZA, L. D. S.; GOMES, J. D. C.; LUCIANO, D. S. S.; JAYME, D. C. G. Calagem e adubação para a mandioca. In: BORGES, A. L. (org.). *Recomendações de calagem e adubação para abacaxi, acerola, banana, citros, mamão, mandioca, manga e maracujá*. 2. ed. Brasília, DF: **Embrapa**, 2021.

BRAULIO, C. S. **Microrganismos na promoção de crescimento de feijão-caupi e maracujazeiro e no controle de fusariose**. 2023. 147 f. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias: Agricultura Tropical) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2023.

BYJU, G.; SUJA, G. Mineral nutrition of cassava. In: **Advances in Agronomy**, v. 159, p. 169-235, 2020.

CARVALHO, T. L. G.; BALDANI, V. L. D.; REIS, V. M.; DOBEREINER, J.; BALDANI, J. I. Nitrogen signalling in plant interactions with associative and endophytic diazotrophic bacteria. **Journal of Experimental Botany**, v. 65, n. 19, p. 5631-5642, 2014.

CEN, X.; LI, H.; ZHANG, Y.; HUANG, L.; LUO, Y. Isolation and plant growth promotion effect of endophytic siderophore-producing bacteria: a study on halophyte *Sesuvium portulacastrum*. **Plants**, v. 13, p. 2703, 2024.

CHANWAY, C. P.; ANAND, R.; YANG, H. Nitrogen fixation outside and inside plant tissues. In: **Advances in Biology and Ecology of Nitrogen Fixation**. InTechOpen, 2014.

CHAVES, V. A.; SANTOS, C. E. R.; SILVA, J. R. A.; OLIVEIRA, R. P.; AQUINO, J. P. A.; FREITAS, M. S. M. Desenvolvimento inicial de duas variedades de cana-de-açúcar inoculadas com bactérias diazotróficas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1595–1602, 2015.

CHENG, Y.; SHI, X.; NARAYANAN, M.; LI, Z.; LI, Y.; MA, Y. Enhancing nutrient uptake efficiency in *Zea mays*: the role of plant growth-promoting bacteria in modifying root characteristics and mobilizing soil nutrients. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 105, n. 9, p. 5030-5039, 2025.

COCK, J. H. Cassava. In: GOLDSWORTHY, P. R.; FISHER, N. M. (ed.). The physiology of tropical field crops. 1. ed. **Chichester: Wiley**, 1984. p. 529-549.

COCK, J. H.; CONNOR, D. J. Cassava. In: SADRAS, V. O.; CALDERINI, D. F. (ed.). Crop physiology: case histories for major crops. 1. ed. [S. l.]: **Academic Press**, 2021. p. 588-633.

COMPAORÉ, J.; STAL, L. J. Effect of temperature on the sensitivity of nitrogenase to oxygen in two heterocystous cyanobacteria. **Journal of Phycology**, v. 46, n. 6, p. 1172-1179, 2010.

DHAWI, F.; DATTA, R.; RAMAKRISHNA, W. Proteomics provides insights into biological pathways altered by plant growth promoting bacteria and arbuscular mycorrhiza in sorghum grown in marginal soil. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Proteins and Proteomics**, v. 1865, n. 2, p. 243-251, 2017.

DIOGO, J.; ALMEIDA, J. F.; ROCHA, M. R.; ARAÚJO, A. P. Organismos diazotróficos e fungos micorrízicos arbusculares no estabelecimento de plantas de mandioca. **Revista Científica – Multidisciplinary**, v. 10, n. 2, p. 1-6, 2023.

DUBEY, R. S.; SRIVASTAVA, R. K.; PESSARAKLI, M. Physiological mechanisms of nitrogen absorption and assimilation in plants under stressful conditions. In: PESSARAKLI, M. (ed.). Handbook of Plant and Crop Physiology. **Boca Raton: CRC Press**, 2021. p. 579-616.

EL-MEIHY, R. M.; HASSAN, S. E. D.; EL-SHAHED, A. M.; FAYED, H. M. Efficiency of heavy metals-tolerant plant growth promoting bacteria for alleviating heavy metals toxicity on sorghum. **Environmental and Experimental Botany**, v. 162, p. 295-301, 2019.

EL-SHARKAWY, M. A. Cassava biology and physiology. **Plant molecular biology**, v. 56, p. 481-501, 2004.

EL-SHARKAWY, M. A. Physiological characteristics of cassava tolerance to prolonged drought in the tropics: Implications for breeding cultivars adapted to seasonally dry and semiarid environments. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Colombia, v. 19, n. 4, p. 257-286, 2007.

ESMAEILZADEH, J.; AHANGAR, A. G. Influence of soil organic matter content on soil physical, chemical and biological properties. **International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences**, v. 4, n. 4, p. 244-252, 2014.

FERNANDES, A. M.; BULEGON, L. G.; SÁ, M. E.; GALLO, L. A.; RONCATTO, G.; HUNGRIA, M. Growth and nitrogen uptake by potato and cassava crops can be improved by *Azospirillum brasilense* inoculation and nitrogen fertilization. **Horticulturae**, v. 9, n. 3, p. 301, 2023.

FERNANDES, A. M.; SILVA, J. A.; EBURNEO, J. A. M.; LEONEL, M.; GARRETO, F. G. S.; NUNES, J. G. S. Growth and nitrogen uptake by potato and cassava crops can be improved by *Azospirillum brasilense* inoculation and nitrogen fertilization. **Horticulturae**, v. 9, n. 3, p. 301, 2023.

FREITAS, A. D. S.; SILVA, E. M.; NOGUEIRA, D. C.; OLIVEIRA, L. L. Fixação biológica de nitrogênio no Semiárido Brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, p. 585–597, 2015.

FRETES, C. E. de; WIDIANTO, D.; PURWESTRI, Y. A.; NURINGTYAS, T. R. Plant growth-promoting activity of endophytic bacteria from sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **Indonesian Journal of Biotechnology**, v. 26, n. 4, p. 190-196, 2021.

GUPTA, S.; PANDEY, S. ACC deaminase producing bacteria with multifarious plant growth promoting traits alleviates salinity stress in French bean (*Phaseolus vulgaris*) plants. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, p. 1506, 2019.

HAKIM, S.; NAZIR, R.; AHMAD, M.; IQBAL, A.; MAHMOOD, S. Illumina sequencing of 16S rRNA tag shows disparity in rhizobial and non-rhizobial diversity associated with root nodules of mung bean (*Vigna radiata* L.) growing in different habitats in Pakistan. **Microbiological Research**, v. 231, p. 126356, 2020.

HEIJO, G.; PEREIRA, M. G.; OLIVEIRA, R. P.; SANTOS, C. E. R.; MELO, I. S. Interaction among endophytic bacteria, sweet sorghum (*Sorghum bicolor*) cultivars and chemical nitrogen fertilization. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 97, n. 2, p. 245, 2021.

HOWELER, R. H. Diagnosis of nutritional problems of cassava. In: HOWELER, R. H. The cassava handbook: a reference manual based on the Asian regional cassava training course, held in Thailand. Bangkok, TH: **Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT)**, p. 305–320, 2012.

HUNGRIA, M.; BARBOSA, J. Z.; RONDINA, A. B. L.; NOGUEIRA, M. A. Improving maize sustainability with partial replacement of N fertilizers by inoculation with *Azospirillum brasilense*. **Agronomy Journal**, v. 114, n. 5, p. 2969-2980, 2022.

HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; MENDES, I. C. **Fixação biológica de nitrogênio na cultura da soja. Londrina: Embrapa Soja, 2001.** (Circular Técnica, 35). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/459673/1/circTec35.pdf>. Acesso em: 6 jun. 2025.

IMRAN, A.; HAFEEZ, F. Y.; MALIK, K. A. Diazotrophs for lowering nitrogen pollution crises: looking deep into the roots. **Frontiers in Microbiology**, v. 12, p. 637815, 2021.

KABANGE, N. R.; SAWA, A.; NAKALE, T. Multiple facets of nitrogen: from atmospheric gas to indispensable agricultural input. **Life**, v. 12, n. 8, p. 1272, 2022.

KHALIFA, M.; ELTAHIR, E. A. B. Assessment of global sorghum production, tolerance, and climate risk. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 7, p. 1184373, 2023.

KHAWAJA, C.; ALI, M.; AHMAD, I.; HUSSAIN, M.; FAROOQ, A. Energy Sorghum: an alternative energy crop: a handbook. **WIP Renewable Energies**, 2014. Disponível em: <http://oar.icrisat.org/9049/>. Acesso em: 03 jan. 2024.

LIU, Q.; LIU, J.; ZHANG, P.; HE, S. Root and tuber crops. In: VAN ALFEN, N. K. (ed.). **Encyclopedia of agriculture and food systems**. San Diego: Academic Press, 2014. p. 46–61.

LIU, X.; LI, Q.; ZHENG, J.; WANG, Y.; HUANG, D. *Paenibacillus* strains with nitrogen fixation and multiple beneficial properties for promoting plant growth. **PeerJ**, v. 7, p. 19, 2019.

LOPES, E. A. P.; SILVA, A. D. A. D.; MERGULHÃO, A. C. D. E. S.; SILVA, E. V. N. D.; SANTIAGO, A. D.; FIGUEIREDO, M. D. V. B. Co-inoculation of growth promoting bacteria and *Glomus clarum* in micropropagated cassava plants. **Revista Caatinga**, v. 32, n. 1, p. 152-166, 2019.

MAGALHÃES, P. C.; DURAES, F. O. M.; SCHAFFERT, R. E. **Fisiologia da planta de sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa-CNPMS, 2000. 46p. (Circular Técnica, 3).

MAHMUD, K.; TAHIR, H. A. S.; ZEESHAN, M.; MUKHTAR, T.; SHAHID, M. Current progress in nitrogen fixing plants and microbiome research. **Plants**, v. 9, n. 1, p. 97, 2020.

MAY, A.; OLIVEIRA, E. P.; CARDOSO, M. J.; MAGALHÃES, P. C. **Cultivo de sorgo sacarino em áreas de reforma de canaviais**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2013. 36p. (Circular Técnica, 186).

MEKUREYAW, M. F.; PANDEY, C.; HENNESSY, R. C.; NICOLAISEN, M. H.; LIU, F.; NYBROE, O.; ROITSCH, T. The cytokinin-producing plant beneficial bacterium *Pseudomonas fluorescens* G20-18 primes tomato (*Solanum lycopersicum*) for enhanced drought stress responses. **Journal of Plant Physiology**, v. 270, p. 153629, 2022.

MOREIRA, F. M. S.; ANDRADE, D. S.; SIQUEIRA, J. O. Bactérias diazotróficas associativas: diversidade, ecologia e potencial de aplicações. **Comunicata Scientiae**, v. 1, n. 2, p. 74-99, 2010.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. Fixação biológica de nitrogênio atmosférico. In: MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. (ed.). **Microbiologia e Bioquímica do Solo**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2006. p. 449-541.

NAKAO, A. H.; SANTOS, R. D.; PEREIRA, D. H.; PEREIRA, M. G.; ZUFFO, A. M. Intercropping *Urochloa brizantha* and sorghum inoculated with *Azospirillum brasilense* for silage. **Revista Ciência Agronômica**, v. 49, n. 3, p. 501-511, 2018.

NASCENTE, A. S.; FILIPPI, M. C.; SANTOS, L. P.; OLIVEIRA, M. C. Upland rice gas exchange, nutrient uptake and grain yield as affected by potassium fertilization and inoculation of the diazotrophic bacteria *Serratia* spp. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 6, p. 944-953, 2019.

NASSAR, N.; VIZZOTTO, C. S.; SCHWARTZ, C. A.; PIRES JUNIOR, O. R. Cassava diversity in Brazil: the case of carotenoid-rich landraces. **Genetics and Molecular Research**, v. 6, n. 1, p. 116-121, 2007.

OLIVEIRA, A. L. M.; CANDEIA, J. A.; OLIVEIRA, R. C.; DOBEREINER, J.; BALDANI, J. I. Response of micropropagated sugarcane varieties to inoculation with endophytic diazotrophic bacteria. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 34, p. 59-61, 2003.

OLIVEIRA, E. P.; SANTOS, J. D. O.; MELO, C. S.; OLIVEIRA, A. L. M.; CARVALHO, T. L. G. Humic substances and plant growth-promoting bacteria enhance corn (*Zea mays* L.) development. **South African Journal of Botany**, v. 166, p. 539–549, 2024.

PEREIRA, L. F. M.; SANTOS, H. L.; ZANETTI, S.; DE OLIVEIRA BRITO, I. A.; DOS SANTOS TOZIN, L. R.; RODRIGUES, T. M.; DE ALMEIDA SILVA, M. Morphology, biochemistry, and yield of cassava as functions of growth stage and water regime. **South African Journal of Botany**, v. 149, p. 222–239, 2022.

PINHO, R. M. A.; RODRIGUES, J. A. S.; ROCHA, J. R. A. S.; REZENDE, A. V.; RODRIGUES, I. de A. Sorghum cultivars of different purposes silage. **Ciência Rural**, v. 45, p. 298–303, 2015.

QUEIRÓS, L. S. S.; VALICHESKI, R. R.; DE OLIVEIRA, S. S. C.; CRUZ, S. J. S.; STÜRMER, S. L. K.; DE OLIVEIRA, S. G. M. Aspectos biométricos e nutricional de cultivares de mandioca com inoculantes biológicos. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 17, n. 2, p. e11762, 2024.

RIBAS, P. M. Plantio. In: RODRIGUES, J. A. S. (Ed.). **Cultivo do sorgo**. 4. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2008. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/491913/4/plantio.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2024.

RODRÍGUEZ, B. A.; SICARDI, M.; FRIONI, L. Plant genotype and nitrogen fertilization effects on abundance and diversity of diazotrophic bacteria associated with maize (*Zea mays* L.). **Biology and Fertility of Soils**, v. 51, p. 391–402, 2015.

SANTI, C.; BOGUSZ, D.; FRANCHE, C. Biological nitrogen fixation in non-legume plants. **Annals of Botany**, v. 111, n. 5, p. 743-767, 2013.

SANTOS, C. L. R.; BORGES, W. L. B.; OLIVEIRA, E. P.; OLIVEIRA, R. P.; MELO, I. S. Contribution of a mixed inoculant containing strains of *Burkholderia* spp. and *Herbaspirillum* spp. to the growth of three sorghum genotypes under increased nitrogen fertilization levels. **Applied Soil Ecology**, v. 113, p. 96–106, 2017.

SANTANA, S. R. A.; FREITAS, A. D. S.; OLIVEIRA, A. L. M.; MELO, I. S.; SOUSA, T. J. Inoculation of plant growth-promoting bacteria attenuates the negative effects of drought on sorghum. **Archives of Microbiology**, v. 202, p. 1015–1024, 2020.

SCHLEMPER, T. R.; ROSSETTO, P. B.; SILVA, F. G.; LIMA, M. R.; SOUSA, T. J. Effect of *Burkholderia tropica* and *Herbaspirillum frisingense* strains on sorghum growth is plant genotype dependent. **PeerJ**, v. 6, p. e5346, 2018.

SHIGAKI, T. Cassava: The nature and uses. In: CABALLERO, B.; FINGLAS, P. M.; TOLDRÁ, F. **Encyclopedia of Food and Health**. 1. ed. [s.l.]: Academic Press, 2016. p. 687-693.

SILVA, J. C.; ALMEIDA, K. S.; MOREIRA, L. A.; GOMES, J. M.; NUNES, J. C. Plant growth-promoting bacteria in sorghum development in copper-contaminated soil. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 59, p. e1660, 2024.

SILVA, R.; SANTOS, C. E. R.; MELO, C. S.; PEREIRA, M. G.; BALDANI, J. I. *Gluconacetobacter diazotrophicus* changes the molecular mechanisms of root development in *Oryza sativa* L. growing under water stress. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 1, p. 333, 2020.

TAMBURINI, G.; BOMMARCO, R.; WANGER, T.; KREMEN, C.; VAN DER HEIJDEN, M. G. A.; LIEBMAN, M.; HALLIN, S. A diversificação agrícola promove múltiplos serviços ecossistêmicos sem comprometer a produtividade. **Science Advances**, v. 6, 2020.

THIEBAUT, F.; RIBEIRO, T. P.; MOURA, L. M.; SILVA, F. R.; CAMPOS, D. V. The impact of non-nodulating diazotrophic bacteria in agriculture: understanding the molecular mechanisms that benefit crops. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 19, p. 11301, 2022.

TONUKARI, N. J. Cassava and the future of starch. **Electronic journal of biotechnology**, v. 7, n. 1, p. 5-8, 2004.

UMAPATHI, M.; SUGANTHI, V.; ARULSELVI, P. *Bacillus* sp. and *Pseudacidovorax intermedius* colonization effect on biochemical and metabolites expression in drought-stressed *Sorghum bicolor* (L.) Moench. **Plant Stress**, v. 11, p. 100424, 2024.

VENKATESWARAN, K.; RANGASAMY, P.; SIVANESAN, I. Classification, distribution and biology. In: ARUNA, C.; VISARADA, K. B. R. S.; BHAT, B. V.; TONAPI, V. A. (ed.). **Breeding Sorghum for Diverse End Uses**. Duxford, UK: Woodhead Publishing, 2019. p. 33-60.

VIDEIRA, S. S.; ARAÚJO, J. L. S.; BALDANI, V. L. D. **Metodologia para isolamento e posicionamento taxonômico de bactérias diazotróficas oriundas de plantas não leguminosas**. Seropédica, RJ: Embrapa Agrobiologia, 2007. (Documentos, 234).

VIEIRA, R. F. **Ciclo do nitrogênio em sistemas agrícolas**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. v. 13.

WANG, Y. H.; UPADHYAYA, H. D.; DWEIKAT, I. Sorghum. In: SINGH, M.; UPADHYAYA, H. D. (ed.). **Genetic and Genomic Resources for Grain Cereals Improvement**. London: Academic Press, 2016. p. 227–251.

WU, Z.; KONG, Z.; LU, S.; HUANG, C.; HUANG, S.; HE, Y.; WU, L. Isolation, characterization and the effect of indigenous heavy metal-resistant plant growth-promoting bacteria on sorghum grown in acid mine drainage polluted soils. **The Journal of General and Applied Microbiology**, v. 65, n. 5, p. 254–264, 2019.

Capítulo 1

Avanços científicos no uso de pgbp para o cultivo de sorgo: Uma abordagem sistemática e bibliométrica

Avanços científicos no uso de PGPB para o cultivo de sorgo: uma abordagem sistemática e bibliométrica

RESUMO: O sorgo é uma cultura resiliente de grande importância agrícola, destacando-se pela alta eficiência no uso de água e energia. Contudo, fatores como a baixa disponibilidade de nutrientes no solo e estresses abióticos podem limitar seu potencial produtivo. Nesse contexto, bactérias promotoras de crescimento de plantas (PGPB) têm se mostrado alternativas sustentáveis pois podem estimular o crescimento da cultura por meio da fixação biológica de nitrogênio (FBN) e a tolerância a estresses adversos. Este estudo teve como objetivo realizar uma análise bibliométrica e sistemática da produção científica sobre o uso de PGPB no cultivo de sorgo entre os anos de 2014 a 2024. Para isso, foi realizada uma busca por artigos científicos nas bases de dados Scopus e Web of Science. Os dados bibliográficos foram refinados e analisados no software R utilizando o pacote Bibliometrix. Foi possível identificar os principais autores, instituições, periódicos, palavras-chave e redes de colaboração científica. Um aumento foi observado na produção científica global, com destaque para o Brasil e os Estados Unidos como líderes em publicações. As pesquisas abordaram principalmente os efeitos das PGPB no crescimento do sorgo, FBN e mitigação de estresses abióticos, como seca e contaminação por metais pesados. O uso de PGPB também foi relacionado à fitorremediação, destacando-se como estratégia para a recuperação ambiental e aumento da produtividade agrícola. Esses resultados contribuem para o entendimento das tendências e avanços na aplicação de PGPB no cultivo de sorgo, além de fornecer subsídios para pesquisas futuras.

Palavras-chave: Biblioshiny, fixação biológica de nitrogênio, estresse abiótico, inoculantes.

Scientific advances in the use of PGPB for sorghum cultivation: a systematic and bibliometric approach

ABSTRACT: Sorghum is a resilient crop of great agricultural importance, notable for its high efficiency in water and energy use. However, factors such as low soil nutrient availability and abiotic stresses can limit its productive potential. In this context, plant growth-promoting bacteria (PGPB) have proven to be sustainable alternatives as they can stimulate crop growth through biological nitrogen fixation (BNF) and tolerance to adverse stresses. This study aimed to conduct a bibliometric and systematic analysis of scientific production on the use of PGPB in sorghum cultivation between 2014 and 2024. To this end, a search for scientific articles was conducted in the Scopus and Web of Science databases. The bibliographic data were refined and analyzed in the R software using the Bibliometrix package. It was possible to identify the main authors, institutions, journals, keywords, and scientific collaboration networks. An increase was observed in global scientific production, with Brazil and the United States standing out as leaders in publications. The research mainly addressed the effects of PGPB on sorghum growth, FBN, and mitigation of abiotic stresses, such as drought and heavy metal contamination. The use of PGPB was also related to phytoremediation, standing out as a strategy for environmental recovery and increased agricultural productivity. These results contribute to understanding trends and advances in the application of PGPB in sorghum cultivation, as well as providing subsidies for future research.

Keywords: Biblioshiny, biological nitrogen fixation, abiotic stress, inoculants.

1. INTRODUÇÃO

O sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] é uma cultura originária da África, reconhecido como o quinto cereal mais cultivado mundialmente (KHAWAJA et al., 2014; BALAKRISHNA et al., 2019). Devido ao seu metabolismo C4, apresenta alta eficiência no uso da água e da energia, o que lhe garante tolerância à seca e ao estresse térmico (VENKATESWARAN et al., 2019). Essa capacidade de adaptação a condições áridas torna a cultura um recurso estratégico para o aproveitamento de áreas com solos marginais e para a promoção da segurança alimentar (LIU et al., 2023b).

A produção mundial de sorgo foi estimada em aproximadamente 61,3 milhões de toneladas em 2024, representando um aumento de 4,3% em relação ao ano anterior (58,8 milhões de toneladas), cultivadas em cerca de 40 milhões de hectares. A África concentra cerca de 46% desse total, com destaque para Nigéria, Sudão e Etiópia, principais produtores do continente (IGC, 2024). As Américas respondem por aproximadamente 35% da produção global, com os Estados Unidos, México, Brasil e Argentina figurando entre os maiores produtores. A produção norte-americana apresentou queda, enquanto os demais países latino-americanos registraram crescimento, especialmente o Brasil, que passou de 5,0 para 5,2 milhões de toneladas, com produtividade média brasileira está próxima de 3 t ha⁻¹, acima da média global de 2,5 t ha⁻¹ (KHALIFA; ELTAHIR, 2023).

Culturas resilientes como o sorgo podem se beneficiar de estratégias que promovam maior eficiência na absorção de nutrientes e na resistência a estresses ambientais. Nesse contexto, as bactérias promotoras de crescimento vegetal (PGPB, do inglês *plant growth-promoting bacteria*) têm ganhado destaque como uma abordagem sustentável e ecológica para melhorar o desempenho das plantas. Inoculantes microbianos à base de bactérias do gênero *Bacillus*, classificadas como rizobactérias promotoras de crescimento de plantas (PGPR), estão registrados em patentes como a US 9,615,583 B2 e a US 2020/0123076 A1 associadas a cultura do sorgo. Tais formulações podem ser aplicadas para promover o crescimento vegetal, melhorar a eficiência na absorção de nitrogênio e aumentar a tolerância a estresses abióticos (BOBECK; PEARCE, 2020; KLOEPPER et al., 2017).

O mecanismo de ação do PGPB envolve diversos processos, como a fixação biológica de nitrogênio (FBN) (SANTOS et al., 2017; BARROS et al., 2020), a

produção de fitohormônios como auxinas e giberelinas (UMAPATHI et al., 2024) e a expansão do sistema radicular (DHAWI; DATTA; RAMAKRISHNA, 2017; AMORA-LAZCANO et al., 2022). Além disso, essas bactérias produzem sideróforos (EL-MEIHY et al., 2019) e solubilizam fosfatos (FRETES et al., 2021; MAREQUE et al., 2015), e assim podem disponibilizar nutrientes para as plantas. As PGPB desempenham papel essencial não apenas na promoção do crescimento vegetal, mas também na mitigação de estresses abióticos. Em condições de déficit hídrico, essas bactérias contribuem para a tolerância das plantas por meio da produção de fitohormônios como o ácido indolacético (AIA), que estimula o crescimento radicular, favorecendo maior absorção de água. Além disso, muitas estirpes induzem a síntese de osmólitos compatíveis, como prolina e açúcares solúveis, além de ativarem o sistema antioxidante enzimático, reduzindo o acúmulo de espécies reativas de oxigênio (GROVER et al., 2014; SANTANA et al., 2020; SANTOS et al., 2023).

Em ambientes contaminados por metais pesados, as PGPB podem atuar na biorremediação, imobilizando ou transformando elementos tóxicos como cádmio, chumbo e zinco. Esse efeito é alcançado por meio da produção de sideróforos, exopolissacarídeos e enzimas redox, que reduzem a biodisponibilidade desses metais no solo e, conseqüentemente, sua absorção pelas plantas (MISHRA; SINGH; ARORA, 2014; ZAINAB et al., 2020). Além disso, essas bactérias podem induzir a expressão de genes de tolerância, proporcionando maior acúmulo de biomassa e menor estresse oxidativo em plantas cultivadas em solos contaminados (HAYYAT et al., 2020; SILVA et al., 2024).

Outra aplicação relevante do PGPB está na fitorremediação de solos contaminados por metais pesados. Essas bactérias auxiliam na recuperação ambiental, enquanto promovem o desenvolvimento das plantas (WU et al., 2019; BOECHAT et al., 2020). Entretanto, o sucesso dessas interações é influenciado por uma série de fatores, como genótipo da planta, práticas de manejo agrícola, condições ambientais e métodos de aplicação. Assim, torna-se imprescindível aprofundar as investigações para entender melhor a relação entre PGPB e sorgo.

Estudos recentes indicam que a inoculação com essas bactérias pode promover o crescimento vegetal, aumentar a biomassa, elevar os teores de clorofila e otimizar o acúmulo de nitrogênio no sorgo, além de conferir resistência ao estresse abiótico, como seca e salinidade, por meio da melhora na absorção de

água e nutrientes, produção de osmoprotetores (como prolina e açúcares solúveis), aumento da atividade de enzimas antioxidantes (como catalase, peroxidase e superóxido dismutase) e modulação de fitohormônios, principalmente auxinas e citocininas, que regulam o crescimento e a resposta ao estresse (DHAWI; DATTA; RAMAKRISHNA, 2017; SCHLEMPER et al., 2018; UMAPATHI et al., 2024). Além disso, destacam-se suas contribuições para a melhoria da qualidade do sorgo sacarino, tornando-o mais eficiente para a produção de bioenergia (DÍAZ-FRANCO et al., 2018; AQUINO et al., 2022).

Diante das diversas funções desempenhadas pelas PGPB e da importância agrônômica do sorgo, é pertinente verificar de que forma essas interações têm sido abordadas na literatura recente. Dessa forma, este estudo tem como objetivo analisar, por meio de uma revisão bibliométrica e sistemática, a produção científica relacionada ao uso de PGPB no cultivo de sorgo entre 2014 e 2024 a fim de identificar os principais periódicos de pesquisa, autores, instituições, palavras-chave dos documentos, buscando compreender os avanços obtidos na área, identificar lacunas de conhecimento e destacar os principais focos de investigação, além de fornecer subsídios para estudos futuros na área.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Neste estudo, foi realizada uma busca por artigos científicos nas bases de dados Scopus e Web of Science, abrangendo o período de 2014 a 2024 (Figura 1). Todos os procedimentos de recuperação e coleta de dados foram concluídos em 20 de agosto de 2024. As estratégias de pesquisa foram as seguintes: (TITLE-ABS-KEY ("diazotrophic bacteria" OR "plant growth-promoting bacteria" OR "biological nitrogen fixation" OR "inoculant" OR "bioinput") AND TITLE-ABS-KEY ("sorghum")) AND PUBYEAR > 2013 AND PUBYEAR < 2025.

Figura 1. Fluxograma de triagem e seleção dos dados.



Os dados bibliográficos brutos, incluindo autores, títulos, fontes, resumos, palavras-chave, endereços e referências citadas, foram importados nos formatos CSV (Scopus) e texto simples (Web of Science) e analisados por meio do pacote Bibliometrix (ARIA; CUCCURULLO, 2017), no software R (R CORE TEAM, 2024). Esse processo permitiu a remoção de duplicatas.

Os dados importados foram refinados de acordo com os seguintes critérios: (i) apenas artigos de periódicos; (ii) estudos que mencionaram "sorghum" no título ou resumo; (iii) estudos que incluíssem os termos "plant growth-promoting bacteria", "diazotrophic bacteria", "rhizobacteria" ou "biological nitrogen fixation" no

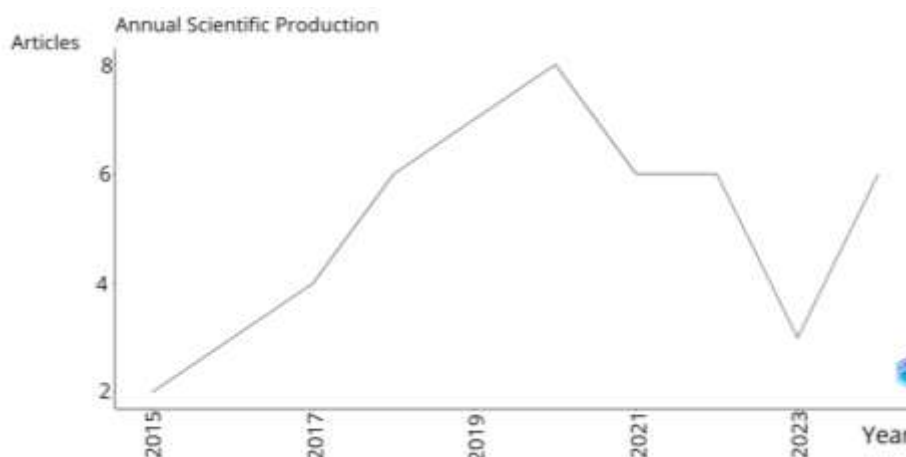
título, resumo ou palavras-chave. O arquivo xlsx gerado após o refinamento foi importado para o Biblioshiny, uma interface gráfica que facilita o uso do pacote Bibliometrix, para realizar a análise de publicações e citações anuais, análise de países, instituições, autores, periódicos, documentos, palavras-chave, entre outros.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Mapeamento científico

Com base no processo de recuperação, foram selecionados 69 artigos indexados nas bases de dados Scopus e Web of Science. Na Figura 2 pode ser visualizada a quantidade de documentos publicados por ano, mostrando a evolução da produção científica relacionada ao uso de bactérias promotoras de crescimento vegetal na cultura do sorgo, entre 2014 e 2024.

Figura 2. Produção científica anual sobre o uso de PGPB no cultivo de *Sorghum bicolor* de 2014 a 2024.



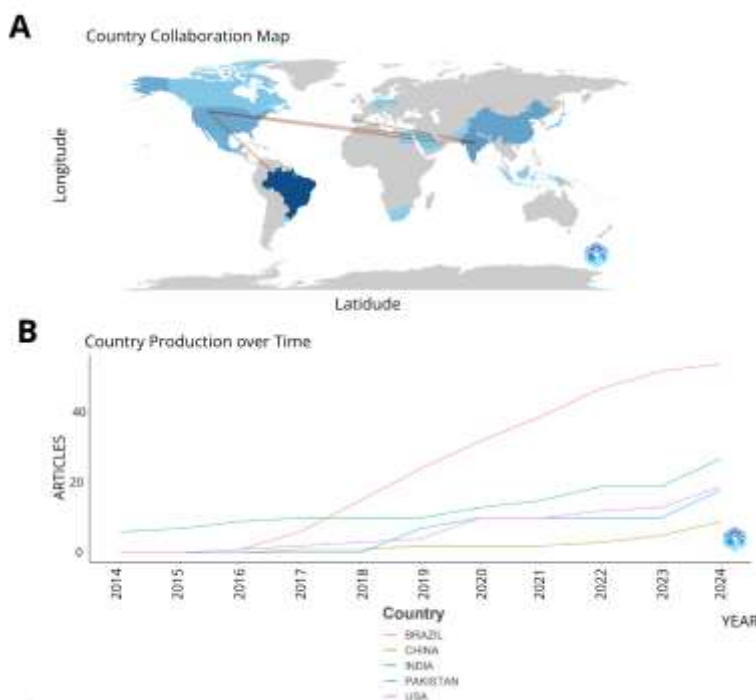
A produção científica na área analisada apresentou um crescimento progressivo a partir de 2015, alcançando seu ponto máximo em 2020, com cerca de oito publicações. Entre os anos de 2021 e 2022 foram publicados doze artigos na área. Uma queda acentuada é notada no ano de 2023, onde as publicações foram reduzidas a três artigos, seguida de uma recuperação em 2024, quando o número retornou a seis publicações. Embora não seja possível afirmar com precisão as causas dessa oscilação, é possível que efeitos tardios da pandemia de

COVID-19, como atrasos na execução de projetos e redução de fomento em determinadas áreas, tenham contribuído para a diminuição observada em 2023.

O número de publicações de autores, conforme suas afiliações, reflete a produção científica dos países (Figura 3A). A intensidade da cor azul no mapa do país indica o volume de atividade de publicação, com azul mais escuro indicando um número maior de publicações, já a colaboração internacional é representada pelas linhas de conexão vermelhas no mapa. Entre 2014 e 2024, o Brasil foi um dos protagonistas na pesquisa sobre uso de bactérias promotoras de crescimento vegetal em sorgo, seguido por Estados Unidos, Índia, China e México. Além disso, o Brasil posiciona-se entre os países com maior envolvimento em colaborações internacionais, especialmente com Estados Unidos, Canadá, Holanda e Uruguai.

Houve um aumento consistente da sua produção científica entre 2014 e 2024, atingindo cerca de 54 aparições de autores do país, indicando sua liderança na área (FIGURA 3B).

Figura 3. (A) Distribuição geográfica de publicações científicas e colaboração de países e (B) crescimento das publicações dos cinco principais países produtores de pesquisa sobre uso de PGPB no cultivo de *Sorghum bicolor*.

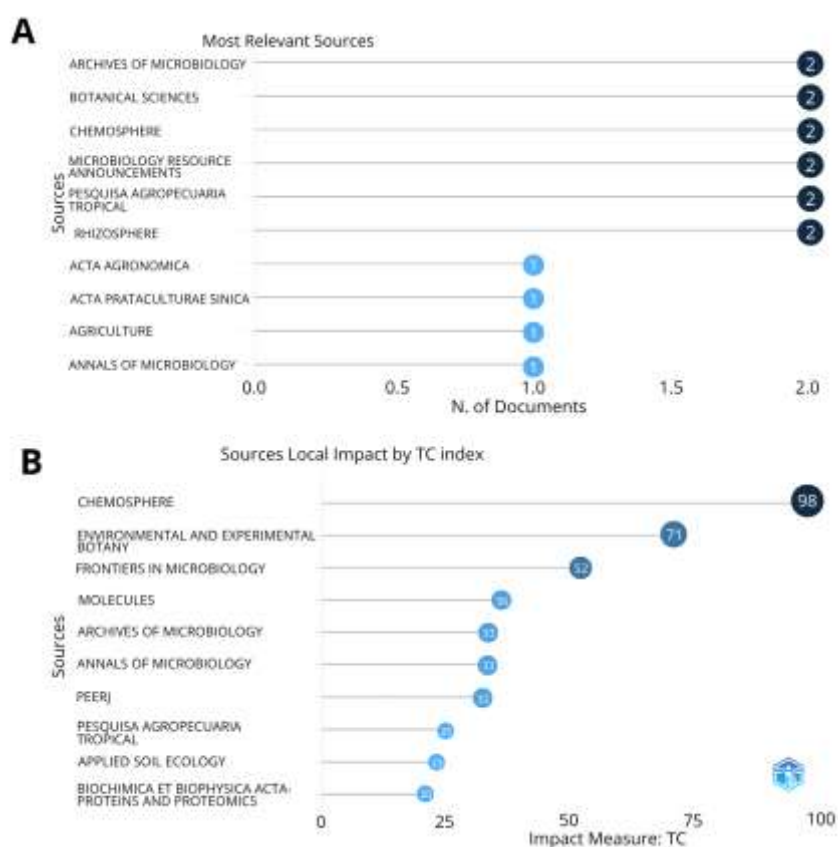


O cenário de liderança científica brasileira coincide com o expressivo aumento da produção de sorgo no país, que passou de 2.279.114 toneladas em

2014 para 4.498.299 toneladas em 2023, enquanto a área plantada cresceu de 851.146 hectares para 1.344.525 hectares no mesmo período (IBGE, 2023). O crescimento simultâneo da produção científica e agrícola destaca a forte relação entre o avanço do conhecimento científico e o desenvolvimento do setor produtivo.

Os periódicos responsáveis pela disseminação do conhecimento referente à temática investigada no presente estudo estão identificados na Figura 4. Conforme a Figura 4A os periódicos mais relevantes em termos de número de artigos publicados foram Archives of Microbiology, Botanical Sciences, Chemosphere, Microbiology Resource Announcements, Pesquisa Agropecuária Tropical e Rhizosphere. Juntas, realizaram a publicação de 12 artigos sobre o tema.

Figura 4. (A) Os 10 periódicos mais produtivos e (B) os 10 periódicos mais citados em pesquisa sobre uso de PGPB em *Sorghum bicolor*.

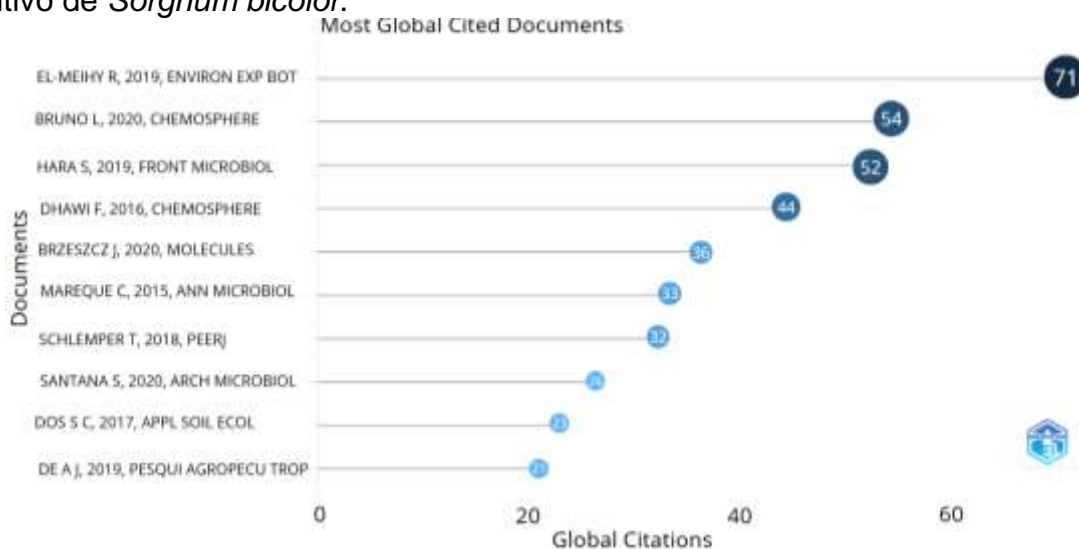


As revistas Chemosphere (n=98), Environmental and Experimental Botany (n=71) e Frontiers in Microbiology (n=52) se destacam como as três mais citadas (Figura 4B). Os dados apresentados indicam que a produção científica sobre o uso de PGPB em *Sorghum bicolor* está disseminada por periódicos de diferentes áreas,

como microbiologia, botânica e ciências ambientais, sugerindo a natureza interdisciplinar desse tema.

Por outro lado, a análise dos autores mais citados evidencia uma predominância de pesquisadores vinculados a instituições indianas, o que está em consonância com a origem do artigo mais referenciado da área (Figura 5). Os cinco trabalhos de mais citados abordam, em sua maioria, temáticas relacionadas à fitorremediação e à tolerância a estresses abióticos, incluindo contaminação por metais pesados e estresse térmico, além da fixação biológica de nitrogênio.

Figura 5. As 10 publicações mais citadas globalmente sobre o uso de PGPB no cultivo de *Sorghum bicolor*.



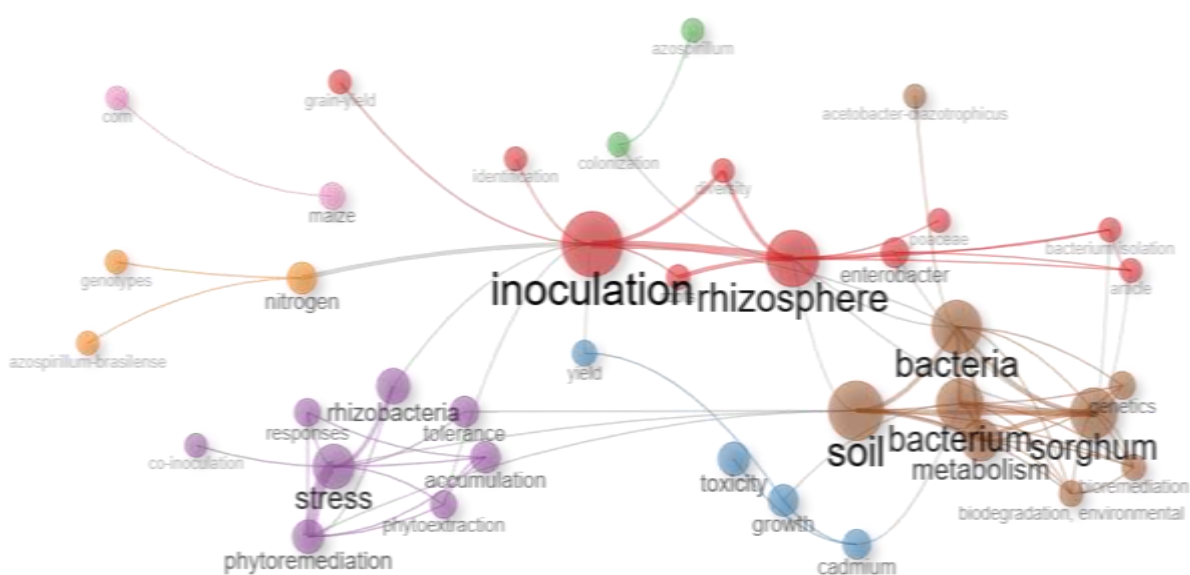
A imagem (Figura 6) apresenta uma nuvem de palavras que destaca as principais palavras-chave definidas como “Keyword Plus”. Quanto maior for o tamanho da palavra na nuvem maior a frequência de utilização. As palavras-chave mais projetadas são: inoculation, sorghum, soil, bacteria, rhizosphere, stress, cadmium, phytoremediation, rhizobacteria e bacterium.

Figura 6. Nuvem de palavras-chave mais frequentes nos estudos sobre uso de PGPB no cultivo de *Sorghum bicolor*.



Para visualizar a correlação entre palavras-chave, uma rede de coocorrência foi gerada no Biblioshiny (Figura 7). Uma relação de co-ocorrência, representada por linhas de ligação, ocorre quando duas palavras-chave aparecem simultaneamente em um ou mais documentos. Além disso, o tamanho do círculo é proporcional à frequência da palavra-chave nos estudos analisados.

Figura 7. Mapa de rede para termos com pelo menos uma ocorrência nas palavras-chave dos estudos sobre uso de PGPB no cultivo de *Sorghum bicolor*.

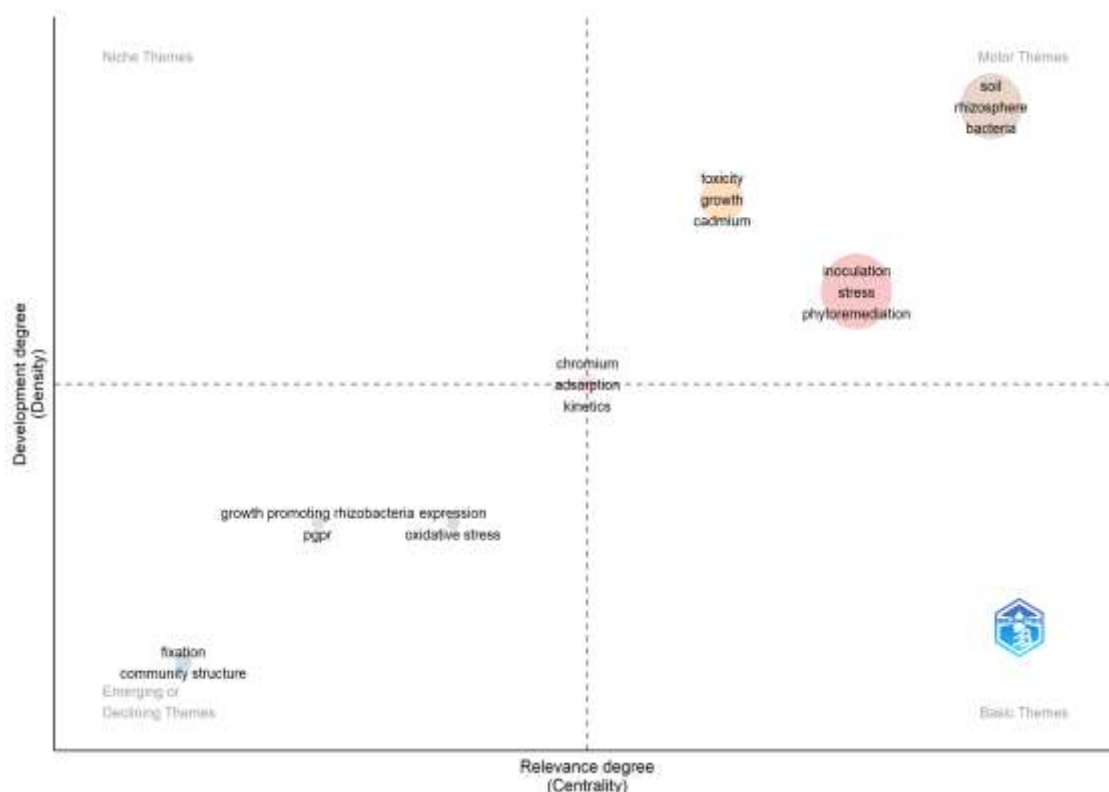


A rede revelou as interações entre os 38 termos mais relevantes, agrupados em sete conjuntos temáticos. No grupo vermelho, destacam-se os termos “rhizosphere” e “inoculation”, que compõem o núcleo central da rede, possivelmente relacionados a estudos sobre bactérias isoladas da rizosfera do sorgo ou à comparação da capacidade de diferentes espécies em se estabelecerem nessa região e promoverem benefícios via inoculação. O grupo azul, com termos como “cadmium”, “growth” e “toxicity”, remete ao papel das PGPBs na mitigação do estresse por metais pesados, como o cádmio. Já no grupo roxo, a palavra “stress” aparece vinculada a “phytoremediation”, sugerindo pesquisas focadas em como as bactérias auxiliam na remoção de contaminantes do solo e nos mecanismos de acúmulo e tolerância das plantas ao estresse abiótico. O grupo marrom, composto por “soil”, “bacteria”, “metabolism” e “sorghum”, sugere estudos sobre a influência das bactérias do solo no metabolismo do sorgo, visando promover o crescimento e auxiliar na fitorremediação. Por fim, os grupos menores, laranja, rosa e verde, apontam para pesquisas que exploram o efeito de bactérias fixadoras de nitrogênio, a resposta de diferentes genótipos de sorgo à inoculação e comparativos entre os resultados obtidos na cultura do milho.

O mapa temático (Figura 8) indica o grau de importância e desenvolvimento das linhas de pesquisa. Os círculos (temas) são compostos por agrupamentos de palavras-chave (Keyword Plus) mais relevantes com base em sua co-ocorrência. O mapa possui dois eixos: relevância (grau de centralidade) e grau de desenvolvimento (densidade). Os quadrantes classificam esses agrupamentos da seguinte forma: o quadrante superior direito indica temas relevantes e desenvolvidos (temas motores); o inferior direito, relevantes, porém não desenvolvidos (temas básicos); o inferior esquerdo, pouco desenvolvidos e pouco relevantes (temas emergentes ou em declínio); e o superior esquerdo, relevantes e não desenvolvidos (temas de nicho) (TAWIAH et al., 2024).

No quadrante de temas motores, foram identificados três clusters: o primeiro é “*soil, rhizosphere, bacteria*”, indicando uma ênfase na interação entre solo, rizosfera e bactérias; o segundo é “*inoculation, stress, phytoremediation*”, que remete a importância da inoculação bacteriana para mitigar estresses e promover a fitorremediação; e o terceiro é “*toxicity, growth, cadmium*”, sugerindo um interesse em estudos sobre toxicidade e crescimento em solos contaminados com cádmio.

Figura 8. Mapa temático que relaciona o grau de relevância e o nível de desenvolvimento dos temas de pesquisa mais explorados em relação ao uso de PGPB no cultivo de *Sorghum bicolor*.



O quadrante de temas de nicho está vazio, o que sugere que não há tópicos simultaneamente bem desenvolvidos e de pouca relevância na área (Figura 8). De forma semelhante, o quadrante de temas básicos também está vazio, mostrando que não foram identificados tópicos com baixa relevância e desenvolvimento, isso indica que todas as pesquisas mapeadas possuem algum nível de importância e desenvolvimento.

O quadrante de temas emergentes ou em declínio contém três tópicos. O primeiro é “*growth promotion rhizobacteria, PGPR*”, que reflete estudos sobre a promoção do crescimento vegetal por rizobactérias. O segundo, “*expression, oxidative stress*”, indica o interesse em pesquisas envolvendo expressão genética e resposta ao estresse oxidativo. O terceiro, “*fixation, community structure*”, sugere investigações sobre a estrutura da comunidade microbiana e processos de fixação biológica. Esses temas, por estarem nesse quadrante, mostram que estão em fase de desenvolvimento ou estão perdendo força na pesquisa atual. Por fim, o tema “*chromium, adsorption, kinetics*” encontra-se posicionado no centro do mapa. Isso

indica que ele possui relevância e desenvolvimento moderados. Essa distribuição geral revela que a pesquisa sobre bactérias promotoras de crescimento no sorgo está concentrada principalmente em temas motores e emergentes, sem a presença de tópicos que se enquadrem como básicos ou de nicho

Os dados apresentados até aqui fornecem uma visão sobre a evolução da produção científica e os principais autores envolvidos na pesquisa com bactérias promotoras de crescimento vegetal no cultivo de sorgo. A análise bibliométrica destacou os periódicos, autores e instituições mais influentes, além dos temas centrais e emergentes. Compreender essas dinâmicas permite identificar não apenas o estado atual da pesquisa, mas também os caminhos que têm orientado o desenvolvimento científico na área.

3.2 Análise dos avanços atuais e dos principais focos de pesquisa

Nesta seção, serão discutidos os avanços recentes e os principais focos de pesquisa sobre o uso de PGPB no sorgo, com ênfase em dois temas: (1) os efeitos das PGPB no crescimento e fixação biológica de nitrogênio, (2) o uso dessas bactérias na mitigação de estresses abióticos. Essas considerações permitirão visualizar as contribuições científicas mais relevantes e os desafios que ainda precisam ser superados.

3.2.1 Efeitos das PGPB no crescimento e fixação biológica de nitrogênio no sorgo

Estudos realizados entre 2014 e 2024 mostram que o uso de PGPB promove o aumento das principais variáveis de crescimento do sorgo (Tabela 1). Pesquisas com bactérias dos gêneros *Pseudomonas* (DHAWI; DATTA; RAMAKRISHNA, 2017), *Burkholderia*, *Herbaspirillum* e *Enterobacter* (SCHLEMPER et al., 2018; AQUINO et al., 2021, WU, et al. 2019), *Stenotrophomonas*, *Bacillus*, *Agrobacterium*, *Paenibacillus* (ANTUNES et al., 2019) *Azospirillum* (SILVA et al., 2024; NAKAO et al., 2018), *Ranheella* (DÍAZ-FRANCO et al., 2018) relatam aumentos na biomassa das raízes e da parte aérea, na área foliar, teor de clorofila, acúmulo de N, bem como no diâmetro do caule e na altura das plantas.

A inoculação com PGPB também influencia positivamente a qualidade do sorgo. Os resultados obtidos por Aquino et al. (2022) mostraram que *Burkholderia*

e *Paenibacillus* proporcionaram aumentos nos níveis de °Brix e açúcares no sorgo sacarino, alcançando resultados comparáveis aos obtidos com fertilizantes nitrogenados. De forma semelhante, o maior teor de açúcar no sorgo sacarino foi relatado com a inoculação de *Pseudomonas*, *Herbaspirillum*, *Ranhello* e *Azospirillum* (DÍAZ-FRANCO et al., 2018). Esses efeitos destacam o potencial do uso de PGPB para melhorar atributos requeridos para a indústria de biocombustíveis.

Os principais mecanismos de promoção de crescimento relatados, são a produção de ácido indol-3-acético (AIA), sideróforos, 1-aminociclopropano-1-carboxilato desaminase (ACC desaminase), solubilização de fosfato e fixação biológica de nitrogênio (FBN). Algumas PGPB conseguem produzir ou alterar a concentração de reguladores de crescimento, como AIA, citocininas e etileno (VEJAN et al., 2016). O AIA, uma das auxinas mais ativas nas plantas, regula o crescimento e desenvolvimento radicular. Baixas concentrações promovem o alongamento da raiz primária, enquanto altas estimulam pelos radiculares e raízes laterais, ampliando a área e o acesso a nutrientes do solo (VANCHERON et al. 2013)

Outro mecanismo importante é a regulação da produção de etileno, um hormônio relacionado à senescência e à resposta ao estresse. As plantas respondem a diferentes estresses ambientais, como frio, seca, inundações, infecções por patógenos e presença de metais pesados, sintetizando o 1-aminociclopropano-1-carboxilato (ACC), que atua como precursor do etileno (GLICK, 2012). A ativação da enzima ACC desaminase pelas bactérias reduz a produção de etileno em condições de estresse hídrico, visto que essa enzima é utilizada para degradar seu precursor (UMAPATHI et al., 2024).

Na natureza, o ferro se encontra predominantemente na forma de Fe^{3+} , que possui baixa solubilidade. Para contornar essa limitação, PGPB secretam sideróforos, compostos proteicos que quelam o Fe^{3+} do ambiente. Em condições de deficiência de ferro, os sideróforos microbianos disponibilizam esse nutriente para as plantas, promovendo seu crescimento (VEJAN et al., 2016). Além disso, em áreas contaminadas por metais pesados, as bactérias produtoras de sideróforos podem quelar não apenas Fe^{3+} , mas também outros íons metálicos, contribuindo para a mitigação dos efeitos da poluição (ZHANG et al., 2023).

Bactérias promotoras de crescimento também podem converter fosfatos insolúveis em formas acessíveis para as plantas, melhorando a fertilidade do solo e o crescimento das plantas por meio de mecanismos que envolvem a produção de ácidos orgânicos, fosfatase ácida e a redução do pH (CHEN et al., 2006). A Tabela 1 sintetiza os mecanismos de promoção de crescimento em *Sorghum bicolor* descritos em diferentes estudos, destacando as bactérias utilizadas, os genótipos avaliados, os efeitos sobre as plantas e as condições experimentais.

Tabela 1. Mecanismos de promoção de crescimento em *Sorghum bicolor* por meio da inoculação de bactérias.

Referência	Bactéria	Genótipo	Mecanismos de PGP	Efeito na planta	Ambiente Experimental	Duração do ensaio
Santos et al. (2017)	<i>Herbaspirillum seropedicae</i> (ZMS176) <i>Burkholderia kururiensis</i> (16,109) <i>B. tropica</i> (Ppe6)	9920044, BRS 655 e BR 501	FBN	↑ rendimento de grãos, biomassa, teor de N na parte aérea e eficiência de uso de N.	Campo (Brasil)	120 dias
Aquino et al. (2022)	<i>Burkholderia</i> sp. (IPACC10) <i>Paenibacillus</i> sp. (IPACC38)	Palo Alto N52K1009	FBN	↑ produção de biomassa, açúcares e °Brix.	Campo (Brasil)	110 dias
Antunes et al. (2019)	<i>Bacillus</i> (ESA 392, ESA 398, ESA 407) <i>Stenotrophomonas</i> (ESA 397) <i>Agrobacterium</i> (ESA 401)	BRS Ponta Negra	FBN, AIA	↑ biomassa de raiz, parte aérea e acúmulo de N.	Casa de vegetação (Brasil)	62 dias
Silva et al., (2018)	<i>Azospirillum brasilense</i> (Ab-V5) <i>Enterobacter</i> sp. (ESA 57)	BRS Ponta Negra	FBN, AIA	↑ biomassa de parte aérea e acúmulo de N.	Campo (Brasil)	75 dias
Díaz-Franco et al. (2018)	<i>Pseudomonas</i> sp. (BPSON) <i>Herbaspirillum</i> sp. (BH) <i>Ranherella aquatilis</i> (BRA) <i>Azospirillum</i> sp. (BAZO)	Dale, Cañero	FBN, Fitohormônios	↑ altura, diâmetro do colmo, clorofila, conteúdo de açúcar, biomassa de parte aérea e raiz.	Campo e casa de vegetação (México)	90 dias

Referência	Bactéria	Genótipo	Mecanismos de PGP	Efeito na planta	Ambiente Experimental	Duração do ensaio
Nakao et al. (2018)	<i>Azospirillum brasilense</i>	Ranchero, A9902	FBN, AIA	↑ massa seca de parte aérea.	Campo (Brasil)	NR*
Schlemper et al. (2018)	<i>Burkholderia tropica</i> <i>Herbaspirillum frisingense</i>	SRN-39, Shanqui-Red, BRS330, BRS509	IAA, Sideróforos	↑ biomassa.	Casa de vegetação (Holanda)	30 dias
Andrade et al. (2019)	<i>Azospirillum brasilense</i>	1G282 e AG1090	FBN, Fitohormônios	↑ massa seca de raiz.	Casa de vegetação (Brasil)	53 dias
Heijo et al. (2021)	<i>Enterobacter</i> sp. (UYSB89) <i>Kosakonia</i> sp. (UYSB139)	M81E e ADV2010	FBN, AIA	↑ massa seca da parte aérea e raiz.	Casa de vegetação (Uruguai)	120 dias
Santana et al. (2022)	<i>Azospirillum brasilense</i>	Volumax, 201813B 201814B	NR*	Não houve efeito nas variáveis estudadas.	Campo (Brasil)	NR*

Referência	Bactéria	Genótipo	Mecanismos de PGP	Efeito na planta	Ambiente Experimental	Duração do ensaio
Mareque et al. (2015)	<i>Rhizobium</i> sp. (UYSB13) <i>Pantoea</i> sp. (UYSB45)	M81E	FBN, AIA, ACC desaminase, Solubilização de fosfato	↑ altura, massa seca de raiz e parte aérea.	Casa de vegetação (Uruguai)	90 dias
Aquino et al. (2019)	<i>Bacillus subtilis</i> (IPACC26, IPACC30)	Palo Alto N52K1009	FBN, AIA	↑ altura, diâmetro do caule, massa seca da parte aérea e raiz.	Casa de vegetação (Brasil)	30 dias
Fretes et al. (2021)	<i>Paenibacillus</i> sp. (BB7) <i>Bacillus</i> sp. (PIB1B) <i>Bacillus</i> sp. (PLB1B)	Numbu	FBN, AIA, ACC desaminase, Solubilização de fosfato, atividade antagônica	↑ comprimento do caule, biomassa, comprimento da raiz.	Casa de vegetação (Indonésia)	28 dias
Machado et al. (2016)	UFRGS Om57	BRS810	FBN	↑ massa seca da parte aérea e da raiz.	Casa de vegetação (Brasil)	45 dias

NR*: não relatado

O principal mecanismo pelo qual as PGPBs beneficiam o sorgo é a fixação biológica de nitrogênio, processo pelo qual o nitrogênio atmosférico (N_2) é convertido em amônia (NH_3) por meio da ação da enzima nitrogenase, encontrada em certos procariontos (MUS et al., 2016). A FBN é potencializada pela inoculação bacteriana, como proposto por Santos et al. (2017) ao observarem um aumento de 4% na FBN e uma eficiência de uso de N 28,9% maior após a aplicação de linhagens de *Burkholderia* e *Herbaspirillum*. No entanto, o sorgo apresenta alto potencial para fixar N_2 mesmo sem inoculação com bactérias simbióticas (BARROS et al., 2020).

A FBN reduz o uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos, aumenta o teor de nutrientes das plantas e melhora a saúde do solo (MAHMUD et al., 2020). Nesse contexto, bactérias do gênero *Bacillus* demonstraram potencial para promover ganhos em altura, diâmetro do caule e massa seca da parte aérea, com desempenho semelhante ao de plantas fertilizadas com nitrogênio. Além disso, destacaram-se por proporcionarem maior biomassa radicular em comparação às plantas fertilizadas apenas com N (AQUINO et al., 2019). Ensaio com a inoculação de *Stenotrophomonas*, *Bacillus*, *Agrobacterium*, *Paenibacillus* e *Azospirillum* também resultaram em biomassa de raiz similar a observada nos tratamentos nitrogenados (ANTUNES et al., 2019). Aquino et al. (2019) também demonstraram que houve aumento no acúmulo de nitrogênio e no teor de clorofila com a inoculação de PGPB, embora em menor grau, quando comparado à fertilização com N. Ainda assim, esses dados destacam o potencial dessas bactérias como suplemento de nitrogênio por meio da FBN.

Diversos fatores podem influenciar a eficiência da FBN, incluindo o genótipo da planta, o manejo agrícola e as condições ambientais. Por exemplo, em estudo com três genótipos inoculados com *Burkholderia* spp. e *Herbaspirillum*, houve uma maior fixação de N_2 no genótipo forrageiro do que nos genótipos granífero e sacarino (SANTOS et al., 2017). Esse resultado corrobora os resultados obtidos por Schlemper et al. (2018) nos quais os efeitos de bactérias dos mesmos gêneros promoveram crescimento em cultivares de sorgo granífero, mas não tiveram efeito significativo sobre o sorgo sacarino. A inoculação com *Azospirillum*, usada como cepa de referência, também não apresentou diferenças significativas, em relação ao controle negativo nas variáveis avaliadas para o sorgo sacarino. Em contraste,

Rhizobium e *Enterobacter* demonstraram efeitos positivos, promovendo aumentos na biomassa de raiz e parte aérea (MAREQUE et al., 2015).

A interação entre genótipos de sorgo e PGPB é influenciada pela demanda por nitrogênio e ocorre por meio de uma comunicação molecular complexa. Estudos demonstram que, sob deficiência de N, genes relacionados à absorção e assimilação de nitrogênio, como transportadores e redutases de nitrato, são diferencialmente expressos em sorgo, além de genes associados à sinalização hormonal (auxinas e citocininas) e ao metabolismo de aminoácidos (GELLI et al., 2014). A inoculação com estirpes como *Brevibacillus* sp. SR-9 pode ativar em raízes de sorgo genes relacionados ao crescimento vegetal, síntese de metabólitos secundários e resposta ao estresse (LI et al., 2022).

Por outro lado, as PGPBs também modulam sua expressão gênica em resposta aos exsudatos radiculares do sorgo, compostos por açúcares, aminoácidos e fenóis, os quais variam de acordo com o genótipo e o estado nutricional da planta, influenciando a colonização e o desempenho das bactérias (CHEN; LIU, 2024).

Essas evidências reforçam que a interação planta-microrganismo é dinâmica e regulada geneticamente por ambos os parceiros. Essa dinâmica parece estar relacionada ao estágio de desenvolvimento da planta. O sorgo apresenta um ciclo fenológico bem definido, o qual pode variar entre 90 e 130 dias, dependendo da cultivar, das condições edafoclimáticas e do sistema de cultivo adotado (PEREIRA FILHO; RODRIGUES, 2015).

O ciclo é geralmente dividido em cinco fases principais: emergência, perfilhamento, alongamento do colmo, florescimento e maturação fisiológica, que se enquadra em três fases: O ciclo do sorgo pode ser dividido em três fases: Vegetativa (EC1), Reprodutiva (EC2) e Período de maturação do grão (EC3) (MAGALHÃES; SOUZA; SOUZA, 2019). A fase de emergência ocorre logo após a semeadura e se estende até o surgimento da plântula acima do solo, geralmente entre 3 e 7 dias após a semeadura, dependendo da temperatura e umidade. Em seguida, inicia-se o perfilhamento, com o desenvolvimento de brotações laterais, o que contribui para a definição do estande e da arquitetura da planta. A fase de alongamento do colmo marca o início do crescimento vegetativo intenso, caracterizado pelo rápido desenvolvimento do caule e das folhas. O florescimento, etapa reprodutiva crítica, ocorre geralmente entre 50 e 70 dias após a semeadura

e é sensível a estresses hídricos ou nutricionais, os quais podem comprometer a formação de grãos. Por fim, a maturação fisiológica se dá quando o grão atinge o máximo acúmulo de matéria seca e apresenta características visuais como a formação da “linha preta” no embrião (PEREIRA FILHO; RODRIGUES, 2015).

Em um ensaio de campo foi detectada maior fixação de nitrogênio nas raízes em estádios tardios de crescimento, aos 102 dias após a semeadura e os genes estruturais da nitrogenase foram atribuídos a espécies de *Bradyrhizobium* por análise do metagenoma (HARA et al., 2019). Isso sugere que a FBN pode ser modulada pelas demandas nutricionais da planta, intensificando-se em fases de maior necessidade ou formação de reservas. As condições ambientais e o manejo da adubação nitrogenada influenciam diretamente a fixação biológica de nitrogênio.

A influência do método de aplicação é reportada em pesquisas com *Azospirillum*. A inoculação via semente, apesar de ser uma prática comum, pode apresentar o inconveniente de reduzir a emergência das plântulas de sorgo, conforme observado por Andrade et al. (2019). No entanto, no mesmo estudo, essa forma de aplicação também proporcionou aumento na massa seca da raiz. De maneira semelhante, Nakao et al. (2018) relataram que a inoculação via semente elevou a produção total de matéria seca das cultivares Ranchero e A9902. Já a aplicação foliar aos trinta e quatro dias após semeadura em condições de campo, segundo Santana et al. (2022), não resultou em alterações na produção e qualidade nutricional da silagem das cultivares Volumax e 201813B. Dessa forma, os resultados apresentados por esses estudos indicam que a eficácia da inoculação em sorgo pode variar consideravelmente, sendo influenciada por fatores como o método de aplicação, além de outros fatores como genótipo e condições ambientais.

3.2.2 Uso de PGPB na mitigação de estresses abióticos no sorgo

A utilização das PGPB na mitigação de estresses abióticos na cultura do sorgo pode demonstrar eficácia na melhoria do desempenho fisiológico da cultura e no aumento da tolerância a condições adversas, como contaminação por metais pesados e estresses hídricos e térmicos (Tabela 2).

Tabela 2. Aplicação de PGPB em *Sorghum bicolor* submetido ao estresse abiótico.

Referência	Bactéria	Genótipo	Tipo de Estresse	Mecanismos de PGP	Resultado	Ambiente experimental	Duração do ensaio
Liu et al. (2023)	<i>Bacillus</i> sp. (SL-413)	Kyoto Iron Rod 100	Cd Microplástico	ACC desaminase, Transporte de Fe AIA	↑ da biomassa da parte aérea e da raiz; ↓ atividade das enzimas CAT , POD, SOD e conteúdo de ROS	Casa de vegetação (China)	30 dias
Santana et al. (2020)	<i>Enterobacter</i> sp. (ESA 11) <i>Bacillus</i> sp. (ESA 13, ESA 395, ESA 402) <i>Rhizobium</i> sp. (ESA 15), <i>Agrobacterium</i> sp. (ESA 394) <i>Azospirillum brasilense</i> (Ab-V5) <i>Herbaspirillum seropedicae</i> (BR 11417)	BRS Ponta Negra	Hídrico	AIA FBN	↑ fotossíntese líquida e acúmulo de N	Casa de vegetação (Brasil)	47 dias
Anbuganesan et al. (2024)	<i>Bacillus thuringiensis</i> (SE1C2)	NR*	Cd Zn	AIA Sideróforos	↑ comprimento da parte aérea e da raiz; teor de clorofila, carotenoides, enzimas antioxidantes; peso fresco e seco das plantas; ↓ teores de Cd e Zn na planta; níveis de prolina e malondialdeído	Casa de vegetação (Índia)	45 dias
Amora-Lazcano et al. (2022)	<i>Pseudomonas</i> sp.(BI-1) <i>P. mohnii</i> (BIPS-10)	NR*	Nutricional	AIA, Solubilização de P Sideróforos.	↑ diâmetro do caule, altura e peso seco da parte aérea e raiz	Casa de vegetação (México)	30 dias
Bruno et al. (2020)	<i>Bacillus cereus</i> <i>Providencia rettgeri</i> <i>Myroides odoratimimus</i>	NR*	Cr Térmico	Redução de Cr, Solubilização de P, Sideróforos AIA	↑ comprimento de raiz e parte aérea e a biomassa, teores de clorofila, conteúdo de proteína,	Casa de vegetação (Índia)	45 dias

					↓ prolina, malondialdeído, ↑ aumento do conteúdo fenólico e nas atividades de SOD, CAT e POX, ↓ absorção de Cr		
Silva et al. (2024)	<i>Azospirillum brasilense</i>	TAMBO BMR	Cu	Fitormônios, Solubilização de P e K, Sideróforos FBN	↑ índice de clorofila <i>a</i> e <i>b</i> e o desenvolvimento da parte aérea, ↓ teor de Cu na parte aérea.	Casa de vegetação (Brasil)	100 dias
Liu et al. (2024)	<i>Bacillus</i> sp. (SL-413) <i>Enterobacter</i> sp. (VY-1)	Kyoto Iron Rod 100	Microplástico Cd	Solubilização de fosfato e potássio, Sideróforos, AIA	↑ massa e comprimento da parte aérea e de raiz, teor de NPK no solo, número de genes relacionados ao ciclo de N e P na rizosfera.	Casa de vegetação (China)	90 dias
El-Meihy et al. (2019)	<i>Alcaligenes faecalis</i> (MG257493.1) <i>Bacillus cereus</i> (MG257494.1) <i>Alcaligenes faecalis</i> (MG966440.1)	Giza 1	Cu, Cd, Zn e Pb.	NR*	↑ POD, polifenol oxidase, pigmentos fotossintéticos, altura da planta, peso fresco e seco da parte aérea e da raiz.	Casa de vegetação (Egito)	63 dias
Li et al. (2022)	<i>Brevibacillus</i> sp. (SR-9)	Henan Hercules	Cd	Sideróforos, AIA, Solubilização de P e K	↑ peso seco da parte aérea e raiz	Casa de vegetação (China)	90 dias
Wu et al. (2019)	<i>Burkholderia</i> sp. (S6-1) <i>Pseudomonas</i> sp. (S2-3)	NR*	Cu, Cd, Zn e Pb	AIA , ACC desaminase, Sideróforos, Solubilização de P Produção de amônia	↑ altura, peso seco, absorção de N, atividades das enzimas antioxidantes (incluindo SOD, POD e CAT)	Casa de vegetação (China)	60 dias
Santos et al. (2023)	DPP1, MCLR34, MTP78, MTBV12, MTBV77	BRS Ponta Negra	Hídrico	AIA	↑ emissão, alongamento e o comprimento das folhas, alongamento do	Casa de vegetação (Brasil)	70 dias

					caule, altura e o teor de matéria seca da parte aérea.		
Hayyat et al. (2020)	<i>Bacillus velezensis</i>	NR*	Li	NR*	↑ número de folhas, altura da planta, número de panículas e rendimento de grãos	Casa de vegetação (Paquistão)	150 dias
Umaphati et al. (2022)	<i>Bacillus sp. Pseudacidovorax intermedius</i>	CO 30 e K 12	Hídrico	ACC desaminase, AIA e ácido giberélico (GA)	↑ comprimento da raiz, comprimento do broto, índice de vigor da muda e produção total de matéria seca.	<i>in vitro</i> (Índia)	7 dias
Abou-Aly et al. (2021)	<i>Bacillus cereus</i> (MG257494.1) <i>Alcaligenes faecalis</i> (MG966440.1) <i>Alcaligenes faecalis</i> (MG257493.1)	Giza 1	Cu, Cd, Zn e Pb	AIA, GA, Prolina, Ácido salicílico	↑ atividade da desidrogenase, ↓ bioacumulação de metais pesados em raízes e plantas.	Casa de vegetação (Egito)	63 dias
Dhawi et al. (2016)	<i>Pseudomonas sp.</i> (TLC 6-6.5-4)	BTx623	Nutricional Metais pesados	NR*	↑ biomassa de raiz e parte aérea, maior absorção de nutrientes.	Casa de vegetação (EUA)	90 dias
Boechat et al. (2020)	<i>Kluyvera intermedia</i> <i>Klebsiella oxytoca</i> <i>Citrobacter murlinae</i>	NR*	As, Cd e Pb	ACC desaminase, AIA	↑ biomassa de parte aérea e raízes.	Casa de vegetação (Brasil)	45 dias
Peña et al. (2020)	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	Silo Miel 370, Sorgo Silo Miel 315, Sorgo Silo Miel II e Camino 526	Salinidade Térmico	NR*	↑ altura de planta, comprimento de raiz, massa fresca e seca.	<i>in vitro</i> (México)	30 dias
Yaashikaa; Kumar; Saravanan (2020)	<i>Pannonibacter phragmetitus</i>	NR*	Cr	AIA, Solubilização de P	↑ comprimento radicular	<i>in vitro</i> (México)	7 dias
Umaphati et al. (2024)	<i>Bacillus sp. Pseudacidovorax intermedius</i>	CO 30	Hídrico	ACC desaminase, AIA e GA	↑ prolina, proteína, exopolissacarídeos, ACC desaminase, hormônios de crescimento, enzimas	Casa de vegetação (Índia)	57 dias

					antioxidantes: CAT, POD, SOD, GPx ↓ emissão de etileno e espécies reativas de oxigênio.		
Grover et al. (2014)	<i>Bacillus</i> spp.	CSV-15	Hídrico	AIA, Solubilização de P	↑ comprimento do broto e biomassa de raiz com folhas verde-escuras devido ao alto teor de clorofila	Casa de vegetação (Índia)	32 dias
NR*: não relatado							

A inoculação de PGPB demonstrou potencial para mitigar os efeitos do estresse causado por metais pesados no crescimento do sorgo. Bactérias dos gêneros *Bacillus*, *Burkholderia*, *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Providencia*, *Myroides*, *Azospirillum*, *Enterobacter*, *Brevibacillus*, *Kluyvera*, *Klebsiella*, *Citrobacter*, *Pannonibacter* (Tabela 2) foram utilizadas para aliviar os efeitos tóxicos de Cd, Cu, Zn, Pb, Li e Cr.

Fitorremediação é uma técnica biotecnológica que utiliza plantas para acumular contaminantes inorgânicos e orgânicos, metabolizar contaminantes orgânicos e incentivar a degradação microbiana de contaminantes orgânicos na zona da raiz (ARTHUR et al., 2005). *Kluyvera*, *Klebsiella* e *Citrobacter* foram usados na fitorremediação de As, Cd e Pb em solos contaminados por atividades de mineração e foram eficazes em aumentar a fitoextração de Cd e a fitoestabilização de Pb e As em sorgo cultivado em casa de vegetação (BOECHAT et al., 2020). O uso da inoculação com *Burkholderia* aumentou o acúmulo de Pb e a translocação de Zn da raiz para parte aérea no sorgo e *Pseudomonas* ajudou o sorgo a absorver Cu e Zn e melhorou o efeito da fitorremediação (WU et al., 2019).

A inoculação de *Brevibacillus sp.* SR-9, quando comparado com a não inoculação, aumentou o acúmulo de Cd nas partes aéreas e raízes do sorgo em 135 e 53,41%, respectivamente (LI et al., 2022). *Bacillus sp.* SL-413 e *Enterobacter sp.* VY-1 também aumentaram o conteúdo e o acúmulo de Cd no sorgo (LIU et al., 2024). Dessa forma, PGPB não somente favorecem o crescimento vegetal em ambientes contaminados, como também auxiliam na fitorremediação, contribuindo para a recuperação de áreas degradadas. As plantas que acumulam metais em seus tecidos podem ser posteriormente submetidas a técnicas de colheita e remoção controlada de (fitomineração ou fitoextração) (IQBAL et al., 2015.; TAN et al., 2023), o que possibilita o reaproveitamento industrial dos metais ou seu descarte seguro, evita que retornem ao meio ambiente e reduz o risco de contaminação da cadeia alimentar.

Superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), peroxidase (POD) e glutathione peroxidase (GPX) são enzimas que atuam no sistema de defesa enzimático contra o estresse oxidativo minimizando, tamponando e eliminando espécies reativas de oxigênio (ROS) de forma eficiente (IGHODARO; AKINLOYE, 2018; LIU et al., 2023a). Em estudo com sorgo submetido a estresse hídrico, a inoculação de *Bacillus sp.* e *Pseudacidovorax intermedius* aumentou a atividade

das enzimas antioxidantes (SOD, CAT e POD) durante o período de seca e recuperação, além de diminuir significativamente a peroxidação lipídica, indicada pelos menores níveis de malondialdeído (MDA) e aumento do acúmulo de compostos osmoprotetores, como prolina (UMAPATHI et al., 2024). *Bacillus thuringiensis* - SE1C2 quando inoculado em sorgo cultivado em solo contaminado por Cd e Zn também aumentaram as atividades de SOD e CAT (ANBUGANESAN et al., 2024).

Por outro lado, em condições de estresse por cádmio e microplásticos, a inoculação de *Bacillus sp.* SL-413 reduziu as atividades das enzimas SOD, CAT e POD e os níveis de espécies reativas de oxigênio (ROS), indicando que a inoculação resultou em menor estresse, pois limitou a formação de radicais livres e reduziu a necessidade de ativação enzimática (LIU et al., 2023a). Uma análise da expressão gênica demonstrou que *Providencia rettgeri* regula negativamente o gene de síntese de prolina (*p5cs1*) e ativa positivamente genes relacionados a antioxidantes (*sod*, *apx1*, *cat*) e à tolerância ao estresse (*sHsp*). Essas modificações aumentaram a tolerância de plantas de sorgo expostas ao estresse térmico (42 ± 1 °C durante o dia) e ao cromo (Cr) (BRUNO et al., 2020).

De maneira semelhante, a inoculação com *Bacillus sp.* SL-413 em sorgo cultivado em solo contaminado por cádmio (Cd) e microplásticos promoveu o aumento da expressão de genes relacionados a diversas funções cruciais, como transdução de sinal, defesa antioxidante e biologia da parede celular (LIU et al., 2023a). Em um estudo subsequente, análises de redes de ocorrência demonstraram que a inoculação com *Bacillus sp.* SL-413 e *Enterobacter sp.* VY-1 aumentou a diversidade e a estabilidade das comunidades bacterianas do solo. Além disso, melhorou as funções desempenhadas pelas bactérias da rizosfera do sorgo, promovendo um aumento no número de genes relacionados aos ciclos do nitrogênio e do fósforo.

Por outro lado, a inoculação com *Brevibacillus sp.* SR-9 reduziu a diversidade bacteriana na rizosfera do sorgo exposto ao cádmio. Contudo, essa alteração na composição da comunidade do solo resultou em um aumento significativo na abundância relativa de *Actinobacteria* e *Firmicutes*, grupos capazes de fixação de metais, ajudando a proteger as plantas contra danos por peroxidação lipídica em condições de estresse (LIU et al., 2022).

Esses resultados destacam a capacidade da inoculação bacteriana de modular propriedades do solo e da planta. Enzimas como β -glicosidase, urease e fosfatase ácida, ligadas aos ciclos do carbono (C), nitrogênio (N) e fósforo (P), são indicadores da qualidade do solo, mas têm sua atividade reduzida em solos contaminados (ADETUNJI et al., 2017). Em um ensaio conduzido em casa de vegetação o estresse por metais pesados reduziu significativamente as atividades de fosfatases, β -glicosidase e urease. No entanto, a inoculação com *Bacillus thuringiensis* SE1C2 e/ou biochar de medula de bananeira aumentou essas atividades, possivelmente devido à produção de substâncias promotoras de crescimento e alterações na rizosfera, que favoreceram a microbiota e a atividade enzimática do solo. (ANBUGANESAN et al., 2024).

Outra linha de pesquisa importante sobre uso de PGPB envolve a sua aplicação em condições de déficit hídrico e altas temperaturas. A inoculação com cepas de *Bacillus*, por exemplo, contribuiu com a capacidade fotossintética do sorgo sob estresse hídrico (SANTANA et al., 2020) e, também, resultou em maior comprimento da parte aérea, biomassa radicular, teor de clorofila, teor relativo de água nas folhas e teor de umidade do solo (GROVER et al., 2014). Isolados bacterianos de nódulos radiculares de *Adesmia latifolia* e *Ornithopus micrantus*, leguminosas do semiárido brasileiro em condições de seca, promoveram maior crescimento foliar, alongamento do caule, altura e teor de matéria seca, atenuando os efeitos do estresse hídrico no sorgo (SANTOS et al., 2023).

De forma geral, os estudos analisados revelam que o uso de PGPB é uma estratégia sustentável para maximizar a produtividade do sorgo sujeito a estresse abiótico. A capacidade dessas bactérias de modular a microbiota da rizosfera, promover a expressão de genes de defesa e melhorar a fisiologia vegetal sob diversas condições adversas, posiciona como aliadas fundamentais na produção sustentável.

3.3. Perspectivas futuras

Muitos estudos já evidenciaram a capacidade das PGPB em melhorar o desenvolvimento das plantas e aumentar sua resistência a diferentes estresses ambientais. No entanto, há uma lacuna no conhecimento sobre os mecanismos genéticos e bioquímicos que sustentam esses benefícios nas interações entre

plantas e bactérias. Ferramentas modernas, como aquelas baseadas em biologia celular e análises genômicas, incluindo transcriptômica, proteômica, metabolômica, genética e epigenética, auxiliam na exploração e compreensão dessas interações complexas. Um estudo quantitativo de proteômica analisou a interação entre uma bactéria endofítica promotora de crescimento *G. diazotrophicus* e a planta de cana-de-açúcar, usando selo isotópico $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ para distinguir proteínas bacterianas de planta, identificando mais de 400 proteínas, com 78 expressas diferencialmente (LER et al., 2011).

Pang et al. (2018) integraram abordagens de transcriptômica e metabolômica para investigar os mecanismos de colonização e defesa em interações planta–microrganismo em estágios iniciais. Utilizando marcação com isótopos estáveis e análise metabolômica direcionada, os autores demonstraram que a infecção por *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* DC3000 (Pst DC3000) é capaz de modular o movimento estomático por meio da reprogramação da sinalização da planta e da regulação de vias metabólicas primárias. Hen et al. (2022) integrou transcriptômica e metabolômica para investigar colonização e mecanismos de proteção em relações planta–endófito, verificaram que os endófitos conferem benefícios aos seus hospedeiros, especialmente em termos de promoção do crescimento das plantas, aumento das capacidades metabólicas e aumento da resistência ao estresse, as interações planta-endófito consistem em mecanismos complexos entre os dois simbioses.

Um artigo de revisão realizado por Yan et al. (2022) mostra aplicações de espectrometria de massa para mapear proteínas, modificações pós-tradução e perfis metabólicos em plantas sob estresse ou interação colaborativa. Fica evidente que estudos futuros devem incorporar essas técnicas para identificação das combinações mais eficazes entre genótipos de sorgo e cepas de PGPB, considerando as condições específicas de solo e clima, a fim de maximizar o crescimento e desenvolvimento das plantas.

Além da promoção do crescimento, o uso das PGPB tem sido uma alternativa para a recuperação de solos contaminados com metais pesados (KHAN et al., 2009; ALVES et al., 2022; KURNIAWAN et al., 2022). Essas bactérias podem aumentar a tolerância do sorgo a metais pesados, como cádmio, chumbo e zinco, promovendo a fitoextração e a estabilização de contaminantes em áreas degradadas. A maior exploração dessa biotecnologia pode viabilizar o cultivo

sustentável em solos contaminados, ao mesmo tempo em que auxilia na recuperação ambiental.

Outro aspecto importante é o manejo da fertilização nitrogenada em combinação com PGPB para otimizar a FBN. Pesquisas mostram que doses excessivas de nitrogênio suprimem a FBN (SUMAN et al., 2008; SALVAGIOTTI et al., 2009; ZHANG et al., 2021; HUANG et al., 2023), indicando que a aplicação de doses mais equilibradas pode maximizar o benefício das PGPB e reduzir a necessidade de fertilizantes nitrogenados. A aplicação de análises isotópicas com ^{15}N representa uma ferramenta para elucidar a dinâmica da FBN (CHALK et al., 2017; ALAMI et al., 2025; KEEP et al., 2025; PATWARY, et al., 2025) sob diferentes condições de manejo e tratamentos, permitindo uma avaliação mais precisa da contribuição do N atmosférico para o sistema.

Observou-se também que, apesar da variedade de gêneros bacterianos estudados, muitos trabalhos ainda se concentram em experimentos realizados em ambientes controlados. Embora esses estudos sejam muito importantes para compreender os mecanismos de ação das PGPB, eles não representam totalmente as condições encontradas no campo. A ausência de validações em campo dificulta a avaliação do desempenho dessas bactérias em situações práticas de cultivo, o que reforça a necessidade de estudos mais aplicados, que considerem as variáveis do ambiente agrícola.

Por fim, é importante ressaltar que, no Brasil, ainda não há inoculantes específicos registrados para sorgo contendo PGPB, ao contrário do que ocorre com outras culturas, como soja e milho. Nesse sentido, o avanço das pesquisas é fundamental para que inoculantes específicos sejam desenvolvidos e, futuramente, disponibilizados comercialmente, possibilitando que os agricultores usufruam dos benefícios das PGPB na produção de sorgo.

4. CONCLUSÕES

A análise bibliométrica indicou um aumento recente nas pesquisas sobre PGPB no cultivo do sorgo. A maior parte dos estudos foca nos efeitos dessas bactérias no desenvolvimento da planta, na fixação biológica de nitrogênio e na mitigação de estresses abióticos, como seca e contaminação por metais pesados. Além disso, as PGPB têm sido investigadas como ferramentas para fitorremediação

e recuperação de solos degradados, destacando seu potencial para uma agricultura sustentável. No entanto, ainda existem lacunas quanto à eficiência dessas interações em diferentes ambientes e aos mecanismos genéticos e bioquímicos envolvidos. Os resultados deste capítulo confirmam o potencial consolidado das PGPB na agricultura e reforçam a importância de investigar suas aplicações em diferentes condições para ampliar seu uso.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOU-ALY, H. E.; YOUSSEF, A. M.; TEWFIKE, T. A.; EL-ALKSHAR, W. A.; EL-MEIGY, R. M. Reduction of heavy metals bioaccumulation in sorghum and its rhizosphere by heavy metals-tolerant bacterial consortium. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 31, p. 101911, 2021.

ADETUNJI, A. T.; LEWU, F. B.; MULIDZI, R.; NCUBE, B. he biological activities of β -glucosidase, phosphatase and urease as soil quality indicators: a review. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 17, n. 3, p. 794-807, 2017.

ALAMI, N. E.; BOURGUID, M.; KOUIGHAT, M. Advances in nitrogen use efficiency of ^{15}N -enriched fertilizers: a thirty-year review of research and innovations for sustainable agriculture. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, p. 1-23, 2025.

ALVES, A. R.; YIN, Q.; OLIVEIRA, R. S.; SILVA, E. F.; NOVO, L. A. Plant growth-promoting bacteria in phytoremediation of metal-polluted soils: Current knowledge and future directions. **Science of the Total Environment**, v. 838, p. 156435, 2022.

AMORA-LAZCANO, E.; QUIROZ-GONZÁLEZ, H. J.; OSORNIO-ORTEGA, C. I.; CRUZ-MAIA, J. A.; JAN-ROBLERO, J. Plant growth-promoting bacteria belonging to the genera *Pseudomonas* and *Bacillus* improve the growth of sorghum seedlings in a low-nutrient soil. **Botanical Sciences**, v. 100, n. 1, p. 55-66, 2022.

ANBUGANESAN, V.; VISHNUPRADEEP, R.; MEHNAZ, N.; KUMAR, A.; FREITAS, H.; RAJKUMAR, M. Synergistic effect of biochar and plant growth promoting bacteria improve the growth and phytostabilization potential of *Sorghum bicolor* in Cd and Zn contaminated soils. **Rhizosphere**, v. 29, p. 100844, 2024.

ANDRADE, A. F.; ZOZ, T.; ZOZ, A.; OLIVEIRA, C. E. S.; WITT, T. W. Modos de inoculação de *Azospirillum brasilense* em milho e sorgo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 49, p. e53027-e53027, 2019.

ANTUNES, G. R.; SANTANA, S. R. A.; ESCOBAR, I. E. C.; BRASIL, M. S.; ARAÚJO, G. G. L.; VOLTOLINI, T. V.; FERNANDES-JÚNIOR, P. I. Associative diazotrophic bacteria from forage grasses in the Brazilian semi-arid region are effective plant growth promoters. **Crop and Pasture Science**, v. 70, n. 10, p. 899-907, 2019.

AQUINO, J. P. A.; ATUNES, J. E. L.; BONIFÁCIO, A.; ROCHA, S. M. B.; AMORIM, M. R.; ALCÂNTRA NETO, F.; ARAUJO, A. S. F. Plant growth-promoting bacteria improve growth and nitrogen metabolism in maize and sorghum. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 33, n. 3, p. 249-260, 2021.

AQUINO, J. P. A.; MACEDO JUNIOR, F. B.; ANTUNES, J. E. L.; FIGUEREDO, M. V. B.; NETO, F. A.; ARAUJO, A. S. F. Plant growth-promoting bacteria increase the yield of green maize and sweet sorghum. **Journal of Plant Nutrition**, v. 46, n. 1, p. 58-68, 2022.

AQUINO, J. P. A.; MACEDO JUNIOR, F. B.; ANTUNES, J. E. L.; FIGUEREDO, M. V. B.; NETO, F. A.; ARAUJO, A. S. F. Plant growth-promoting endophytic bacteria on maize and sorghum. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 49, p. e56241, 2019.

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959-975, 2017.

ARTHUR, E. L.; RICE, P. J.; RICE, P. J.; ANDERSON, T. A. Phytoremediation— an overview. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 24, n. 2, p. 109-122, 2005.

BALAKRISHNA, D.; KRISHNA, M. L.; KUMAR, A. Tissue culture and genetic transformation in *Sorghum bicolor*. In: Breeding Sorghum for Diverse End Uses. **Woodhead Publishing**, 2019. p. 115-130.

BARROS, B. G. F.; FREITAS, A. D. S.; TABOSA, J. N.; LYRA, M. C. C. P.; MERGULHÃO, A. C. E. S.; SILVA, A. F.; OLIVEIRA, W. S.; FERNADES-JÚNIOR, P. I.; SAMPAIO, E. V. S. B. Biological nitrogen fixation in field-grown sorghum under different edaphoclimatic conditions is confirmed by N isotopic signatures. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 117, p. 93-101, 2020.

BOECHAT, C. L.; CARLOS, F. S.; NASCIMENTO, C. W. A.; QUADROS, P. D.; SÁ, E. L. S.; CAMARGO, F. A. O. Bioaugmentation-assisted phytoremediation of As, Cd, and Pb using *Sorghum bicolor* in a contaminated soil of an abandoned gold ore processing plant. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, p. e0200081, 2020.

BOBECK, D. R.; PEARCE, C. J. Agricultural microbial inoculant compositions and uses thereof. **United States Patent Application Publication**, nº US 2020/0123076 A1, Pub. Date: Apr. 23, 2020.

BRAULIO, C. S. **Microrganismos na promoção de crescimento de feijão-caupi e maracujazeiro e no controle de fusariose**. 2023. 147 f. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias: Agricultura Tropical) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2023.

BRUNO, L. B.; ANDRADE, C. F.; LIMA, A. P.; VASCONCELOS, A. T. R.; SILVA, M. F. Amelioration of chromium and heat stresses in *Sorghum bicolor* by Cr6+ reducing-thermotolerant plant growth promoting bacteria. **Chemosphere**, v. 244, p. 125521, 2020.

CHALK, P. M.; HE, J. Z.; PEOPLES, M. B.; CHEN, D. 15N2 as a tracer of biological N2 fixation: a 75-year retrospective. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 106, p. 36-50, 2017.

CHEN, L.; LIU, Y. The function of root exudates in the root colonization by beneficial soil rhizobacteria. **Biology (Basel)**, v. 13, n. 2, p. 95, 2024.

CHEN, X-L.; SUN, M-C.; SI, J-P.; W, L. Transcriptomic and Metabolomic Approaches Deepen Our Knowledge of Plant–Endophyte Interactions. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, 2022.

DHAWI, F.; DATTA, R.; RAMAKRISHNA, W. Proteomics provides insights into biological pathways altered by plant growth promoting bacteria and arbuscular mycorrhiza in sorghum grown in marginal soil. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Proteins and Proteomics**, v. 1865, n. 2, p. 243–251, 2017.

DÍAZ-FRANCO, A.; RAMÍREZ, C.; RODRÍGUEZ, R.; LÓPEZ, G.; MENDOZA, J. Cepas microbianas con potencial para sustituir la fertilización inorgánica de sorgo dulce (*Sorghum bicolor*). **Revista Internacional de Contaminación Ambiental**, v. 34, n. 3, p. 405-416, 2018.

EL-MEIHY, R. M.; HASSAN, S. E. D.; EL-SHAHED, A. M.; FAYED, H. M. Efficiency of heavy metals-tolerant plant growth promoting bacteria for alleviating heavy metals toxicity on sorghum. **Environmental and Experimental Botany**, v. 162, p. 295–301, 2019.

FRETES, C. E. de; WIDIANTO, D.; PURWESTRI, Y. A.; NURINGTYAS, T. R. Plant growth-promoting activity of endophytic bacteria from sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **Indonesian Journal of Biotechnology**, v. 26, n. 4, p. 190-196, 2021.

PEREIRA FILHO, I. A.; RODRIGUES, J. A. S. **Sorgo: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. 327 p. (Coleção 500 perguntas, 500 respostas).

GELLI, M.; DUO, Y.; KONDA, A. R.; ZHANG, C.; MA, Y. Identification of differentially expressed genes between sorghum genotypes with contrasting nitrogen stress tolerance by genome-wide transcriptional profiling. **BMC Genomics**, v. 15, p. 179, 2014.

GROVER, M.; SINDHU, R.; YADAV, A. Influence of *Bacillus* spp. strains on seedling growth and physiological parameters of sorghum under moisture stress conditions. **Journal of Basic Microbiology**, v. 54, n. 9, p. 951–961, 2014.

HARA, S.; TANAKA, Y.; ARAI, T.; UEDA, Y.; SHIRAI, M. Identification of nitrogen-fixing *Bradyrhizobium* associated with roots of field-grown sorghum by metagenome and proteome analyses. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, p. 407, 2019.

HAYYAT, M. U.; SHAHZAD, S. M.; TARIQ, M.; JAVAID, M. M.; ANJUM, T. Alleviation of lithium toxicity in sorghum (*Sorghum vulgare* Pers.) by inoculation with lithium-resistant bacteria. **Applied Ecology & Environmental Research**, v. 18, n. 6, 2020.

HEIJO, G.; PEREIRA, M. G.; OLIVEIRA, R. P.; SANTOS, C. E. R.; MELO, I. S. Interaction among endophytic bacteria, sweet sorghum (*Sorghum bicolor*) cultivars

and chemical nitrogen fertilization. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 97, n. 2, p. 245, 2021.

HUANG, W.; YANG, Y.; ZHENG, H.; OLESEN, J. E.; REES, R. M.; ZOU, J.; ZHANG, L.; HU, S.; QIAO, B.; WANG, X.; SHEN, S.; YANG, B.; BAI, Z.; ZHENG, A.; LI, W.; SONG, Z.; WEN, X.; YIN, X. Excessive N applications reduces yield and biological N fixation of summer-peanut in the North China Plain. **Field Crops Research**, v. 302, p. 109021, 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA). Tabela 1612: Área plantada, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção da lavoura temporária. Brasília, DF: 2023. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612>>. Acesso em: 04 out. 2024.

IGHODARO, O. M.; AKINLOYE, O. A. First line defence antioxidants-superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and glutathione peroxidase (GPX): Their fundamental role in the entire antioxidant defence grid. **Alexandria Journal of Medicine**, v. 54, n. 4, p. 287-293, 2018.

IGC- Grain Market Report. Sorghum Continues Growing Worldwide, **Sorghum: L' Avebir mise sur le sorgho**, 2024. Disponível em: <https://sorghum-id.com/en/accueil/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

KEPP, J., KIESE, R., KLAUS, V. H., KLEINEBECKER, T., PACAY-BARRIENTOS, N. L., SCHÄUFELE, R. SCHLOTERC, M.; SCHONINGE, I. SCHRUMPFE, M. SCHULZC, S. SCHWARZLERA, T.; SCHWEIZERB, S. A. DANNENMANN, M. Long-term changes of delta15n natural abundance in 72 temperate grassland soils are small and indicate management rather than climate and biodiversity. **Available at SSRN**, p. 2, 2025.

KHAN, M. S.; ZAIDI, A.; WANI, P. A.; OVES, M. Role of plant growth promoting rhizobacteria in the remediation of metal contaminated soils. **Environmental chemistry letters**, v. 7, p. 1-19, 2009.

KHALIFA, M.; ELTAHIR, E. A. B. Assessment of global sorghum production, tolerance, and climate risk. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 7, 2023.

KLOEPPER, J. W.; FADAMIRO, H. Y.; NGUMBI, E. N.; NANGLE, K. W.; WALTHAM, M. Inoculants including *Bacillus* bacteria for inducing production of volatile organic compounds in plants. **United States Patent**, n°: US 9,615,583 B2, Date of Patent: *Apr. 11, 2017.

LI, X.; LIU, Y.; LI, Y.; HAN, H.; ZHANG, H.; JI, M.; CHEN, Z. Enhancing mechanisms of the plant growth-promoting bacterial strain *Brevibacillus* sp. SR-9 on cadmium enrichment in sweet sorghum by metagenomic and transcriptomic analysis. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 23, p. 16309, 2022.

LIU, Y.; ZHANG, H.; HAN, H.; LI, Y.; CHEN, Z. Plant growth-promoting bacteria improve the Cd phytoremediation efficiency of soils contaminated with PE-Cd

complex pollution by influencing the rhizosphere microbiome of sorghum. **Journal of Hazardous Materials**, v. 469, p. 134085, 2024.

LIU, Q.; WANG, J.; WU, A.; SUN, A.; DONG, E.; WANG, Y.; HUANG, X.; HU, H.; JIAO, X. Plant-associated microorganisms during the reproductive period best predict sorghum yield and quality. **Field Crops Research**, v. 304, p. 109167, 2023b.

LERI HEMERLY, A. S.; NOGUEIRA, E. M.; KRÜGER, W. M. A.; BISCH, P. M. Quantitative Proteomic Analysis of the Interaction Between the Endophytic Plant-Growth-Promoting Bacterium *Gluconacetobacter diazotrophicus* and Sugarcane. **Molecular Plant-Microbe Interactions**, v 24, n. 5, p. 562–576, 2011.

LIU, Y.; LI, Y.; HAN, H.; ZHANG, H.; CHEN, Z. Plant growth-promoting bacteria modulate gene expression and induce antioxidant tolerance to alleviate synergistic toxicity from combined microplastic and Cd pollution in sorghum. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 264, p. 115439, 2023a.

MAGALHÃES, P.; SOUZA, T. C.; SOUZA, K. R. D. Capítulo 3. **Biologia e fisiologia do sorgo.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/229658/1/Cap-3-Biologia-fisiologia-do-sorgo.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2025.

MAHMUD, K.; CHEN, D.; DAI, Z.; XU, J.; FAN, J. Current progress in nitrogen fixing plants and microbiome research. **Plants**, v. 9, n. 1, p. 97, 2020.

MAREQUE, C.; HAUZINGER, M.; SCHEIDT, V.; BONATTO, D.; PASSAGLIA, L. M. P. Isolation, characterization and plant growth promotion effects of putative bacterial endophytes associated with sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **Annals of Microbiology**, v. 65, p. 1057-1067, 2015.

MUS, F.; CROOK, M. B.; GARCIA, K.; COSTA, L. M.; GEDDES, B. A.; KANKIPATI, H.; LIN, T.; OKAFOR, U. G.; OLIVA, M. E.; RAGHAVAN, C.; SABBADINI, G.; SHARMA, R.; VARMA PENMETCHA, S.; ANÉ, J. M.; SANTIAGO, J. Symbiotic nitrogen fixation and the challenges to its extension to nonlegumes. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 82, n. 13, p. 3698–3710, 2016.

NAKAO, A. H.; SANTOS, R. D.; PEREIRA, D. H.; PEREIRA, M. G.; ZUFFO, A. M. Intercropping *Urochloa brizantha* and sorghum inoculated with *Azospirillum brasilense* for silage. **Revista Ciência Agronômica**, v. 49, n. 3, p. 501–511, 2018.

PANG, Q. ZHANG, T.; WANG, Y.; KONG, W.; GUAN, Q.; YAN, X.; CHEN, S. Metabolomics of Early Stage Plant Cell-Microbe Interaction Using Stable Isotope Labeling. **Front Plant Sci**, v. 9, p. 760, 2018.

PATWARY, R. H.; SHIFA, S.; WALKER, H.; CAMERON, D. D.; DANIELL, T. Dissecting Soil Microbial N-Cycle Dynamics (Nitrification, Denitrification, Dnra and Anammox) in Fertilised Paddy Soil Using ¹⁵N. **Available at SSRN** 5262622, p. 53, 2025.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing Vienna**, Austria, 2024. Disponível em: <<http://www.r-project.org>>. Acesso em: 30 jan. 2024.

ROONEY, W. L.; KUHLMAN, L. C. Plants and seeds of Sorghum line Tx3361. **United States Patent**, nº US 8,513,499 B2, Date of Patent: Aug. 20, 2013.

SANTANA, I. A.; ALMEIDA, K. S.; NASCIMENTO, A. F. F.; RODRIGUES, A. L. B.; MENDES, R. A. Yield and nutritional value of sorghum genotype silages using *Azospirillum brasilense* in the northern region of the state of Minas Gerais. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 43, n. 4, p. 1721-1736, 2022.

SANTANA, S. R. A.; FREITAS, A. D. S.; OLIVEIRA, A. L. M.; MELO, I. S.; SOUSA, T. J. Inoculation of plant growth-promoting bacteria attenuates the negative effects of drought on sorghum. **Archives of Microbiology**, v. 202, p. 1015-1024, 2020.

SANTOS, C. L. R.; BORGES, W. L. B.; OLIVEIRA, E. P.; OLIVEIRA, R. P.; MELO, I. S. Contribution of a mixed inoculant containing strains of *Burkholderia* spp. and *Herbaspirillum* spp. to the growth of three sorghum genotypes under increased nitrogen fertilization levels. **Applied Soil Ecology**, v. 113, p. 96-106, 2017.

SANTOS, M. S.; VASCONCELOS, B. C.; BULEGON, L. G.; COSTA, F. C.; SOUZA, D. M. Rhizobacteria from root nodules of Brazilian native legumes promote growth of *Sorghum bicolor* L. under drought conditions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 54, n. 5, p. 586-596, 2023.

SALVAGIOTTI, F.; SPECHT, J. E.; CASSMAN, K. G.; WALTERS, D. T.; WEISS, A.; DOBERMANN, A. Growth and nitrogen fixation in high-yielding soybean: Impact of nitrogen fertilization. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 4, p. 958-970, 2009.

SILVA, J. C.; ALMEIDA, K. S.; MOREIRA, L. A.; GOMES, J. M.; NUNES, J. C. Plant growth-promoting bacteria in sorghum development in copper-contaminated soil. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 59, p. e1660, 2024.

SOUSA, J. X. **Promoção do crescimento vegetal por bactérias oriundas de solos com histórico de deposição de manipueira**. 2017. 61 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Qualidade de Ecossistemas) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Cruz das Almas, 2017.

SUMAN, A.; SHRIVASTAVA, A. K.; GAUR, A.; SINGH, P.; SINGH, J.; YADAV, R. L. Nitrogen use efficiency of sugarcane in relation to its BNF potential and population of endophytic diazotrophs at different N levels. **Plant Growth Regulation**, v. 54, p. 1-11, 2008.

SCHLEMPER, T. R.; ROSSETTO, P. B.; SILVA, F. G.; LIMA, M. R.; SOUSA, T. J. Effect of *Burkholderia tropica* and *Herbaspirillum frisingense* strains on sorghum growth is plant genotype dependent. **PeerJ**, v. 6, p. e5346, 2018.

TAN, H. W.; PANG, Y. L.; LIM, S.; CHONG, W. C. A state-of-the-art of phytoremediation approach for sustainable management of heavy metals recovery. **Environmental Technology & Innovation**, v. 30, p. 103043, 2023.

TAWIAH, B.; OFORI, E. A.; CHEN, D.; JIA, H.; FEI, B. Sciento-qualitative study of zinc-iodine energy storage systems. **Journal of Energy Storage**, v. 79, p. 110086, 2024.

UMAPATHI, M.; SUGANTHI, V.; ARULSELVI, P. *Bacillus* sp. and *Pseudacidovorax intermedius* colonization effect on biochemical and metabolites expression in drought-stressed *Sorghum bicolor* (L.) Moench. **Plant Stress**, v. 11, p. 100424, 2024.

VACHERON, J.; DESBROSSES, G.; BOUGAULT, N.; PELLETIER, S.; VANDENKOORNHUYSE, P.; GRÉGOIRE, M.; MOËNNE-LOCCOZ, Y.; PRINSEN, E. Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, p. 356, 2013.

VENKATESWARAN, K.; RANGASAMY, P.; SIVANESAN, I. Classification, distribution and biology. In: ARUNA, C.; VISARADA, K. B. R. S.; BHAT, B. V.; TONAPI, V. A. (ed.). **Breeding Sorghum for Diverse End Uses**. Duxford, UK: Woodhead Publishing, 2019. p. 33-60.

WOLF, E. S. A.; ROONEY, W. L.; JACOBS, T. B. Identification of genetic and environmental factors influencing aerial root traits that support biological nitrogen fixation in sorghum. G3: Genes, Genomes, **Genetics**, v. 14, n. 3, p. 285, 2024.

WU, Z.; KONG, Z.; LU, S.; HUANG, C.; HUANG, S.; HE, Y.; WU, L. Isolation, characterization and the effect of indigenous heavy metal-resistant plant growth-promoting bacteria on sorghum grown in acid mine drainage polluted soils. **The Journal of General and Applied Microbiology**, v. 65, n. 5, p. 254-264, 2019.

YAN, S.; BHAWAL, R.; YIN, Z.; THANNHAUSER, T. W.; ZHANG, S. Recent advances in proteomics and metabolomics in plants. **Mol Horticulture**, v. 2, n. 17, 2022.

ZAINAB, N.; DIN, B. U.; JAVED, M. T.; AFRIDI, M. S.; MUKHTAR, T.; KAMRAN, M. A.; AIN, Q. U.; KHAN, A. B.; ALI, J.; JATOI, W. N.; MUNIS, M. F. H.; CHAUDHARY, H. J. Deciphering metal toxicity responses of flax (*Linum usitatissimum* L.) with exopolysaccharide and ACC-deaminase producing bacteria in industrially contaminated soils. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 152, p. 90–99, 2020.

ZHANG, S.; LIU, Y.; WANG, X.; MA, H.; LI, Q. Significance of soil siderophore-producing bacteria in evaluation and elevation of crop yield. **Horticulturae**, v. 9, n. 3, p. 370, 2023.

ZHANG, Y.; HU, T.; WANG, H.; JIN, H.; LIU, Q.; LIN, Z.; WHANG, X.; A, J.; SUN, D.; SUN, X.; TANG, H. BEI, Q.; CHERUBINI, F.; ARP, H. P. H. Xie, Z. (2021). How do different nitrogen application levels and irrigation practices impact biological nitrogen fixation and its distribution in paddy system?. **Plant and Soil**, v. 467, n. 1, p. 329-344, 2021.

Capítulo 2

Estratégias para otimizar o crescimento do *sorghum bicolor*: bactérias benéficas e adubação nitrogenada em latossolo amarelo distrocoeso

Estratégias para otimizar o crescimento do *Sorghum bicolor*: bactérias benéficas e adubação nitrogenada em Latossolo Amarelo Distrocoeso

RESUMO: O sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] é capaz de associar-se a bactérias promotoras de crescimento vegetal para fixação de nitrogênio, representando uma alternativa promissora para complementar ou reduzir o uso de fertilizantes convencionais. Neste contexto objetivou-se avaliar o efeito de bactérias benéficas associadas à adubação nitrogenada convencional no crescimento do sorgo. Conduziram-se dois experimentos em casa de vegetação, onde foram testadas cinco doses de nitrogênio (0, 30, 60, 90 e 120 kg ha⁻¹) combinadas a inoculação das estirpes UFRB FA72A2-1 (*Bacillus cereus*) e UFRB FA34C2-2 (*Achromobacter spanius*) no sorgo, tanto em solo estéril quanto não estéril. As variáveis de crescimento foram avaliadas aos 60 e 90 dias após semeadura, abrangendo altura das plantas, diâmetro do colmo, índices de clorofila, teores de N, P e K na parte aérea, a massa seca da parte aérea e raízes, além das análises químico-bromatológicas e características morfogênicas. As estirpes *Bacillus cereus* UFRB FA72A2-1 e *Achromobacter spanius* UFRB FA34C2-2 não apresentaram efeito relevante na promoção do crescimento do sorgo. A adubação nitrogenada, especialmente doses entre 90 e 120 kg ha⁻¹ de N, favoreceu as variáveis índice de clorofila, massa seca de folhas verdes e nos teores de nitrogênio e proteína bruta, o que evidencia a importância do manejo adequado da fertilização para o aumento da qualidade nutricional e produtiva do sorgo.

Palavras-chave: Fixação biológica de nitrogênio, bactérias diazotróficas, inoculantes, nutrição nitrogenada.

Strategies to optimize the growth of *Sorghum bicolor*: beneficial bacteria and nitrogen fertilization in dystrocohesive yellow latosol

ABSTRACT : Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] is capable of associating with plant growth-promoting bacteria for nitrogen fixation, representing a promising alternative to complement or reduce the use of conventional fertilizers. In this context, the objective was to evaluate the effect of beneficial bacteria associated with conventional nitrogen fertilization on sorghum growth. Two experiments were conducted in a greenhouse, where five doses of nitrogen (0, 30, 60, 90, and 120 kg ha⁻¹) were tested in combination with inoculation of strains UFRB FA72A2-1 (*Bacillus cereus*) and UFRB FA34C2-2 (*Achromobacter spanius*) strains in sorghum, both in sterile and non-sterile soil. Growth variables were evaluated 60 and 90 days after sowing, covering plant height, culm diameter, chlorophyll indices, N, P, and K contents in the aerial part, dry mass of the aerial part and roots, in addition to chemical-bromatological analyses and morphogenic characteristics. The strains *Bacillus cereus* UFRB FA72A2-1 and *Achromobacter spanius* UFRB FA34C2-2 had no significant effect on promoting sorghum growth. Nitrogen fertilization, especially doses between 90 and 120 kg ha⁻¹ of N, favored the variables chlorophyll index, dry mass of green leaves, and nitrogen and crude protein contents, which highlights the importance of proper fertilization management to increase the nutritional and productive quality of sorghum.

Keywords: Biological nitrogen fixation, diazotrophic bacteria, inoculants, nitrogen nutrition.

1. INTRODUÇÃO

O sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench], tem se destacado na produção agrícola devido à sua adaptação a condições climáticas adversas, como estresse hídrico e altas temperaturas (VENKATESWARAN et al., 2019), o que o torna uma cultura importante no combate à fome em meio às mudanças climáticas (KHALIFA; ELTAHIR, 2023). Além disso, trata-se de uma gramínea altamente energética, com elevada digestibilidade e produtividade, empregada na produção de silagem, corte verde e pastejo, além de seus grãos serem utilizados em rações para animais e na alimentação humana (BUSO et al., 2011). O sorgo também pode ser implementado visando a manutenção da cobertura do solo, contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (GÓES et al., 2020).

Embora seja reconhecido por sua eficiência na absorção de nutrientes e baixa exigência de fertilidade do solo (KHAWAJA et al., 2014; PINHO et al., 2015), as plantas sofrem modificações significativas em sua estrutura, fisiologia, morfogênese e na capacidade de absorção de outros nutrientes caso não haja disponibilidade de N, o que pode impactar negativamente a produtividade (SANTOS et al., 2015).

Efeitos positivos da adubação nitrogenada em variáveis como altura, massa fresca e massa verde da parte aérea foram observados com a aplicação de 120 kg N ha⁻¹ na variedade Cofs19 de sorgo forrageiro (CRAWFORD; SHROFF; PARGI, 2018). Para a variedade AG 1085, a dose de 150 kg N ha⁻¹ foi considerada ideal para maximizar a produção em solos de baixa fertilidade no Cerrado brasileiro (CARVALHO et al., 2024).

O sorgo semelhante a outras espécies de Poaceae, pode associar-se a diversas bactérias, dos gêneros *Pseudomonas* (DHAWI; DATTA; RAMAKRISHNA, 2017), *Burkholderia*, *Herbaspirillum* e *Enterobacter* (SCHLEMPER et al., 2018; AQUINO et al., 2021), *Stenotrophomonas*, *Bacillus*, *Agrobacterium*, *Paenibacillus* (ANTUNES et al., 2019), *Azospirillum* (NAKAO et al., 2018), que são capazes de introduzir N₂ atmosférico por meio da fixação biológica de nitrogênio (FBN).

A FBN representa uma alternativa sustentável para o fornecimento de nitrogênio, possibilitando a redução da dependência da produção industrial desse elemento (MAHAMUD et al., 2020). Essa prática apoia os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), como o ODS 2 - Fome Zero e Agricultura

Sustentável, ODS 12 - Consumo e Produção Responsável e ODS 13 - Ação contra a Mudança Global do Clima, ao reduzir emissões de gases de efeito estufa provenientes da produção e uso de fertilizantes nitrogenados.

No Brasil, ainda não há bactérias promotoras de crescimento vegetal registradas no Ministério de Agricultura e Pecuária (MAPA) para sorgo. O avanço nessa área exige a seleção de estirpes bacterianas eficientes, acompanhada de estudos que avaliem as interações entre genótipos de sorgo e bactérias. Além disso, compreender a influência do ambiente e das práticas de manejo, como a adubação nitrogenada, é essencial para identificar associações capazes de maximizar a FBN.

As estirpes UFRB FA72A2-1 (*Bacillus cereus*) e UFRB FA34C2-2 (*Achromobacter spanius*) descritos por Sousa (2017) e Braulio (2023), além da FBN, demonstraram a capacidade de produzir auxina, protease, amilase e solubilizar P e K. Em ensaio com milho, esses isolados melhoraram o crescimento das plantas, elevaram os níveis de nitrogênio foliar, clorofila total, carotenoides e a taxa fotossintética, além de aumentar a porcentagem e a velocidade de emergência das sementes (OLIVEIRA et al., 2024). Contudo, este é o primeiro estudo que explora os efeitos das estirpes UFRB FA72A2-1 e UFRB FA34C2-2 no cultivo de sorgo. Deve-se considerar ainda que há uma lacuna no conhecimento acerca da dose ideal de nitrogênio para a cultura do sorgo para o cultivo em Latossolo amarelo distrocoeso, solo típico da região dos Tabuleiros Costeiros.

Espera-se que a inoculação com estirpes de *B. cereus* e *A. spanius* promova o desenvolvimento do sorgo e diminua a necessidade de adubação nitrogenada. Dessa forma, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito da inoculação de UFRB FA72A2-1 (*Bacillus cereus*) e UFRB FA34C2-2 (*Achromobacter spanius*) associadas à adubação nitrogenada convencional no crescimento do sorgo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios experimentais foram realizados em casa de vegetação da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), no Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas (CCAAB), situada no município de Cruz das Almas (coordenadas 12°40'39" S, 39°06'23" W, com uma altitude de 220 m). O

clima da região é do tipo Aw, tropical quente e úmido (KÖPPEN; GEIGER, 1928). Os experimentos foram conduzidos entre julho e novembro de 2024.

O solo, classificado como Latossolo Amarelo distrocoeso de textura média, foi coletado na Fazenda Experimental do CCAAB, situada no município de Cruz das Almas, Bahia, Brasil, em uma área anteriormente destinada à pastagem que esteve em pousio por dois anos. A coleta foi realizada na camada subsuperficial (0 a 0,20 m). A caracterização química e física foi conduzida conforme as metodologias compiladas pela Embrapa (2011) e os resultados das análises foram: pH (H₂O) = 5,0; M.O = 2,17 dag kg⁻¹; P (Mehlich 1) = 4,53 mg dm⁻³; K = 105,75 mg dm⁻³; Na = 2,0 mg dm⁻³; Ca = 1,09 cmol_c dm⁻³; Mg = 0,83 cmol_c dm⁻³; H + Al = 3,4 cmol_c dm⁻³; SB = 2,19 cmol_c dm⁻³; CTC = 5,59 cmol_c dm⁻³ e V = 39,2%; S = 11,40 mg dm⁻³; B = 0,07 mg dm⁻³; Cu = 0,49 mg dm⁻³; Mn = 11,5 mg dm⁻³; Fe = 51,80 mg dm⁻³; Zn = 9,10 mg dm⁻³.

Os experimentos foram dispostos em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial (5 x 3), sendo cinco doses de adubação nitrogenada (0, 30, 60, 90 e 120 kg ha⁻¹ de N) aplicadas na forma de ureia combinados com a inoculação das estirpes UFRB FA72A2-1 (*Bacillus cereus*), UFRB FA34C2-2 (*Achromobacter spanius*), e um controle sem inoculação, totalizando de 45 parcelas experimentais no Experimento I e 60 no Experimento II.

As bactérias UFRB FA72A2-1 (*Bacillus cereus*) e UFRB FA34C2-2 (*Achromobacter spanius*) foram isoladas de solos com histórico de deposição de manipueira, por Sousa (2017), e caracterizadas e identificadas por Braulio (2023). Essas estirpes foram cultivadas em meio caldo nutriente, composto por 5 g de NaCl, 5 g de peptona, 1,5 g de extrato de carne e 1,5 g de extrato de levedura dissolvidos em 1000 mL de água destilada, sob agitação contínua a 110 rpm, por 72 horas, a 28 °C. A avaliação da densidade óptica foi feita usando um espectrofotômetro Hitachi, modelo U-2001 UV/Vis, com absorbância registrada em 600 nm, para obter 0,5 de densidade óptica. A inoculação foi feita a partir da imersão das sementes em suspensão bacteriana com uma densidade de 10⁸ células mL⁻¹ por 30 minutos.

2.1. Experimentos

As sementes utilizadas foram da variedade BRS Ponta Negra. Antes da inoculação as sementes passaram pelo processo de desinfestação superficial com etanol 98% (30 segundos), hipoclorito de sódio 1% (2 minutos) e três lavagens com água destilada autoclavada (COSTA et al., 2016).

Para o Experimento I, foram utilizados 5 kg de solo, esterilizados duas vezes em autoclave vertical, com ciclos de 2 horas a 120 °C e um intervalo de 24 horas para resfriamento entre os processos, com o objetivo de eliminar a atividade biológica existente. Após a esterilização, o solo foi acondicionado em vasos plásticos com capacidade de 5 dm³. Para o plantio do Experimento II, 10 kg de solo não estéril foram acondicionados em vasos plásticos com capacidade de 15 dm³. Em ambos os ensaios, o solo foi submetido à calagem com a aplicação de 0,12 t ha⁻¹ de calcário (PRNT= 94%) por kg de solo. Na adubação de plantio foram aplicados 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (superfosfato simples) em todos os tratamentos e 20 kg ha⁻¹ de N (uréia) apenas nos tratamentos nitrogenados (RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ, 1999). A adubação nitrogenada de cobertura foi realizada em dose única aos 22 dias após emergência (DAE), de acordo com os tratamentos.

A semeadura foi realizada colocando dez sementes por vaso a uma profundidade de 2 cm. O desbaste foi realizado aos 15 DAE, mantendo-se uma planta por vaso e a irrigação foi feita diariamente adicionando 500 mL de água, de forma padronizada.

2.2. Avaliações morfológicas e fisiológicas

Aos 60 DAE no Experimento I e aos 90 DAE no Experimento II, todas as plantas de cada tratamento foram avaliadas quanto à altura (ALT), aferida desde o nível do solo até o ponto mais alto da planta, diâmetro do colmo (DC), e índices de clorofila a, b e total (CLA, CLB e CLT) aferidos com clorofilômetro eletrônico (clorofiLOG CFL 1030 Falker).

As plantas foram coletadas e separadas em raízes e parte aérea para registro da massa de matéria fresca. A parte aérea foi subdividida em folhas verdes, colmo, panícula e material senescente. Em seguida, as partes vegetais foram acondicionadas em sacos de papel e submetidas à secagem em estufa com

ventilação forçada, a 65 °C, por 72 horas, para determinação da massa de matéria seca. A parte aérea seca de todas as plantas de cada tratamento foi triturada em um moinho tipo "Wiley" para posterior análises químico-bromatológicas para determinar o teor de nitrogênio (N%) e a proteína bruta (PB), de acordo com os métodos descritos por Silva e Queiroz (2009) em ambos os experimentos.

Adicionalmente, no Experimento I foram analisados os teores (%) de fósforo (P) e potássio (K). A determinação dos teores de macronutrientes foi realizada a partir da digestão sulfúrica-perclórica, obtendo-se extratos para a quantificação do P por fotolorimetria pelo método do amarelo de vanadato, e o K, por fotometria de chama, conforme descrito nos métodos compilados por Silva et al. (2009).

A partir dos 15 DAE no Experimento II, duas vezes por semana, foram registrados o comprimento das lâminas foliares, incluindo os estágios de folhas em expansão, expandidas, senescentes e mortas, desde a lígula até a ponta da folha, bem como o comprimento final do colmo.

Os dados obtidos foram utilizados para determinar diversas variáveis morfogênicas das plantas. A taxa de aparecimento foliar (TApF), expressa em folhas por dia por perfilho, foi calculada pela razão entre o número de folhas surgidas por perfilho e o número de dias do período de avaliação, conforme descrito por Silva et al. (2012). A taxa de alongamento foliar (TAIF), em centímetros por dia por perfilho, foi determinada pela soma da diferença entre o comprimento final e o comprimento inicial das folhas em expansão, dividida pelo número de dias do período, de acordo com o mesmo autor. A taxa de alongamento do colmo (TAIC), expressa em centímetros por dia por perfilho, foi obtida pela diferença entre o comprimento final e o inicial do colmo, dividida pelo número de dias, conforme metodologia descrita por Santos et al. (2024). O filocrono (FIL), expresso em dias por folha, foi calculado como o inverso da TApF. A duração de vida das folhas (DVF) foi determinada com base no intervalo de tempo entre o surgimento da folha e sua completa senescência. O número de folhas vivas por perfilho (NFV) considerou as folhas com coloração verde em pelo menos 50% da lâmina, sem sinais intensos de senescência. O número de folhas senescentes por perfilho (NFS) incluiu aquelas com 50% ou mais da lâmina amarelada, mas ainda fixadas ao colmo. Já o número de folhas mortas por perfilho (NFM) considerou as folhas com coloração marrom ou cinza, com tecido necrosado e sem viabilidade, frequentemente em processo de abscisão.

2.3. Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise de variância com o teste F a 5% de probabilidade. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e por análise de regressão, utilizando o programa estatístico R (R CORE TEAM, 2024).

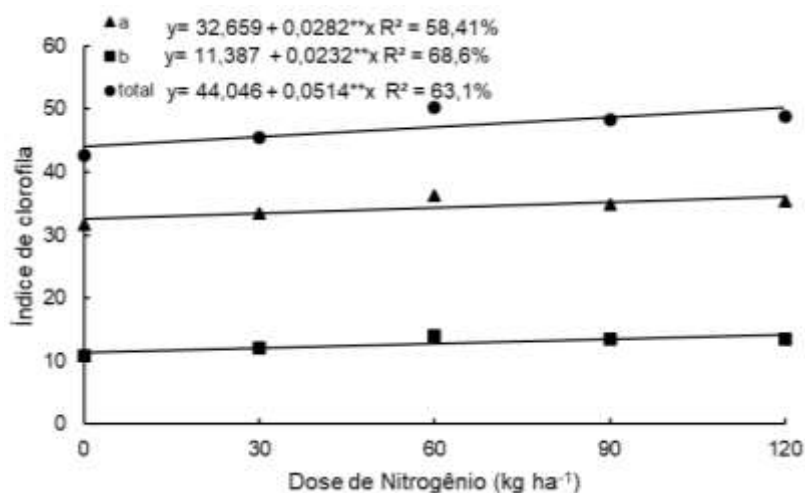
3. RESULTADOS

EXPERIMENTO I

No ensaio com solo estéril, as doses de nitrogênio (kg ha^{-1}) exerceram efeito significativo ($p < 0,05$) sobre as variáveis clorofila a (CLA), clorofila b (CLB), clorofila total (CLT), massa seca de material morto (MSMM), teor de nitrogênio (N%) e proteína bruta (PB) no sorgo. Por outro lado, a inoculação com as estirpes UFRB FA72A2-1 e UFRB FA34C2-2 influenciou de forma isolada ($p < 0,05$) os teores de fósforo (P) e potássio (K) na planta. Houve interação entre as doses de nitrogênio e as bactérias apenas para a variável massa seca de folha verde (MSFV).

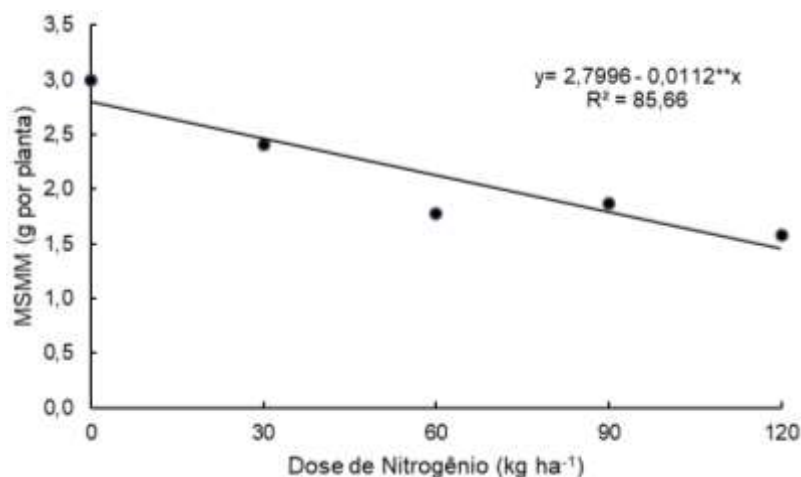
O aumento nas doses de nitrogênio promoveu incrementos lineares nos índices de clorofila nas folhas de sorgo aferidos aos 60 DAE. Os maiores valores estimados foram obtidos com a dose de 120 kg ha^{-1} de N, alcançando 35,3 para CLA, 13,54 para CLB e 48,88 para CLT. Comparando-se com a testemunha (0 kg ha^{-1}), esses valores representaram acréscimos de 11,2, 25,37% e 14,8%, respectivamente (Figura 1).

Figura 1. Índice de clorofila *a*, *b* e total em plantas de sorgo cultivado em solo estéril em função de doses de nitrogênio (kg ha^{-1}). ** Significativo ($p < 0,01$), segundo o teste F.



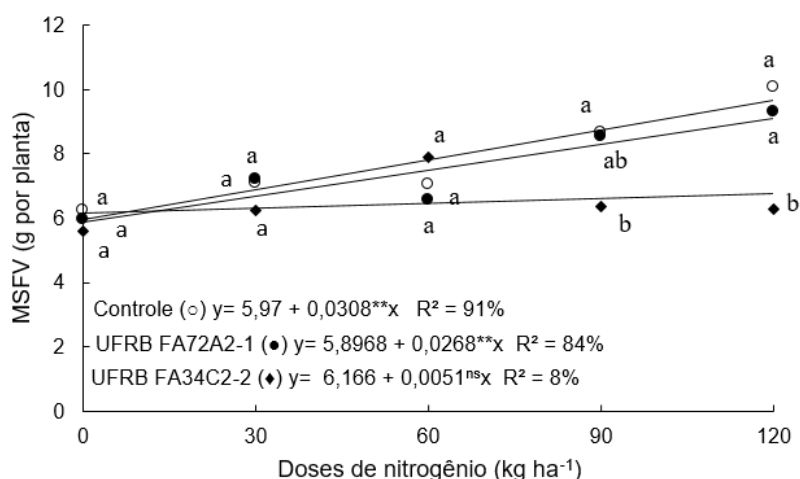
A MSMM foi influenciada significativamente pelas doses de nitrogênio ($p < 0,05$). Na análise de regressão, os dados ajustaram-se a um modelo linear decrescente, o que indica uma redução da MSMM com o aumento das doses de nitrogênio (Figura 2). Houve uma redução de aproximadamente 47,3% na massa seca de material morto com o aumento da dose de nitrogênio de 0 para 120 kg ha^{-1} .

Figura 2. Massa seca de material morto de plantas de sorgo cultivado em solo estéril em função de doses de nitrogênio (kg ha^{-1}). ** Significativo ($p < 0,01$), segundo o teste F.



Houve interação significativa ($p < 0,05$) entre as doses de nitrogênio e as estirpes de bactérias para a variável massa seca de folha verde (MSFV). De modo geral, os maiores valores de MSFV foram observados nas doses mais altas de nitrogênio, independentemente da inoculação (Figura 3). Na dose de 90 kg ha^{-1} de N, o tratamento controle obteve a maior média (8,65 g por planta), sem diferença significativa em relação ao tratamento com UFRB FA72A2-1 (8,53 g por planta), ambos superiores ao tratamento com UFRB FA34C2-2 (6,35 g por planta). Na dose de 120 kg ha^{-1} de N, repetiu-se o padrão, com controle e UFRB FA72A2-1 apresentando médias semelhantes e superiores à UFRB FA34C2-2. Para as demais doses de nitrogênio, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos bacterianos.

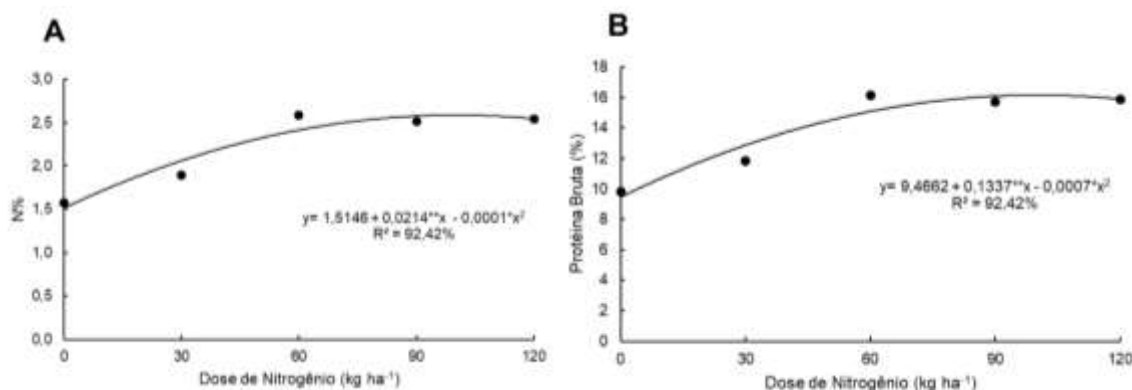
Figura 3. Massa seca de folha verde (g por planta) de plantas de sorgo cultivadas em solo estéril, em função da interação entre as estirpes UFRB FA72A2-1, UFRB FA34C2-2 e o controle sem inoculação, e doses de nitrogênio (kg ha^{-1}). Médias seguidas pela mesma letra minúscula dentro de cada dose de nitrogênio não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). * Significativo ($p < 0,05$), segundo o teste F.



O teor de nitrogênio na parte aérea do sorgo (N%) variou em função das doses de nitrogênio, apresentando um comportamento quadrático com aumento até um ponto ótimo estimado em aproximadamente 107 kg ha^{-1} (Figura 4A). Nesse ponto, o teor máximo estimado foi 2,65%, representando um incremento de cerca de 69% em relação à dose de 0 kg ha^{-1} (1,57%). De modo semelhante, a proteína bruta (PB%) também apresentou resposta quadrática, com dose de N ótima estimada próximo a 95 kg ha^{-1} e valor máximo estimado de 16,14%, o que

corresponde a um aumento de aproximadamente 64% em relação à dose 0 kg ha⁻¹ (9,82%) (Figura 4B).

Figura 4. (A) Teor de nitrogênio de plantas de sorgo cultivado em solo estéril em função de doses de nitrogênio (kg ha⁻¹). * Significativo ($p < 0,05$), segundo o teste F. (B) Proteína bruta de plantas de sorgo em função de doses de nitrogênio (kg ha⁻¹). * Significativo ($p < 0,05$), segundo o teste F.



Isoladamente, a inoculação de UFRB FA72A2-1 e UFRB FA34C2-2 teve efeito ($p < 0,05$) os teores de fósforo (P) e potássio (K) nas plantas (Tabela 1). Para o P, os maiores teores foram verificados no tratamento controle (sem inoculação) (1,403%) e na inoculação com a UFRB FA72A2-1 (1,145%), os quais não diferiram estatisticamente entre si, mas apresentaram valores superiores ao observado no tratamento com UFRB FA34C2-2 (0,435%). Em relação K, os tratamentos inoculados com UFRB FA72A2-1 (0,800%) e UFRB FA34C2-2 (0,832%) resultaram em teores superiores ao controle (0,652%), que apresentou o menor valor entre os tratamentos avaliados (Tukey, $p < 0,05$).

Tabela 1. Teores de fósforo (P) e potássio (K) (%) da parte aérea de plantas de sorgo cultivado em solo estéril em função das estirpes UFRB FA72A2-1, UFRB FA34C2-2 e controle sem inoculação.

Tratamento	Fósforo (P)	Potássio (K)
	-----(%)-----	
Controle	1,403 a	0,652 b
UFRB FA72A2-1	1,145 a	0,800 a
UFRB FA34C2-2	0,435 b	0,832 a
CV (%)	36,98	11,82

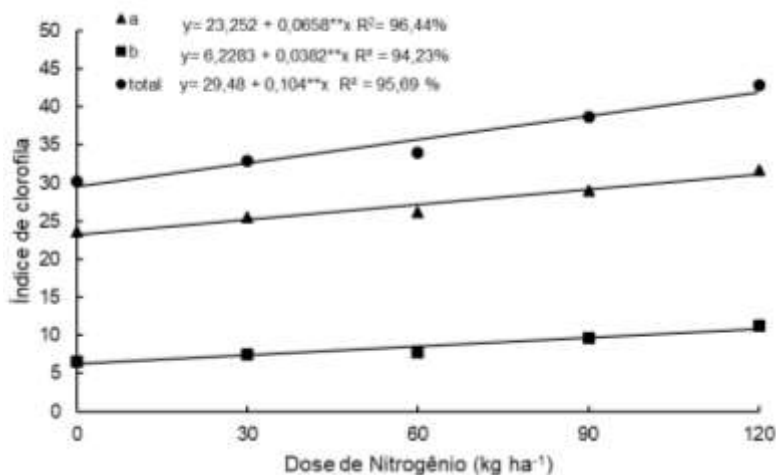
Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si (Teste Tukey, $p < 0,05$).

EXPERIMENTO II

Verificou-se interação significativa ($p < 0,05$) entre as doses de nitrogênio e as estirpes de bactérias para a massa seca de raiz. Além disso, houve efeito isolado ($p < 0,05$) das doses de nitrogênio sobre as variáveis altura (ALT), clorofila a, b e total (CLA, CLB e CLT), massa fresca de parte aérea (MFPA), massa seca de folha verde (MSFV), massa seca de panícula (MSP), teor de nitrogênio (N%) e proteína bruta (PB) determinadas no sorgo. Individualmente a inoculação de UFRB FA72A2-1 e UFRB FA34C2-2 teve efeito ($p < 0,05$) sobre a variável massa seca de folha verde (MSFV). Já a interação entre doses de nitrogênio e bactérias diazotróficas foi significativa ($p < 0,05$) para a massa seca de raiz.

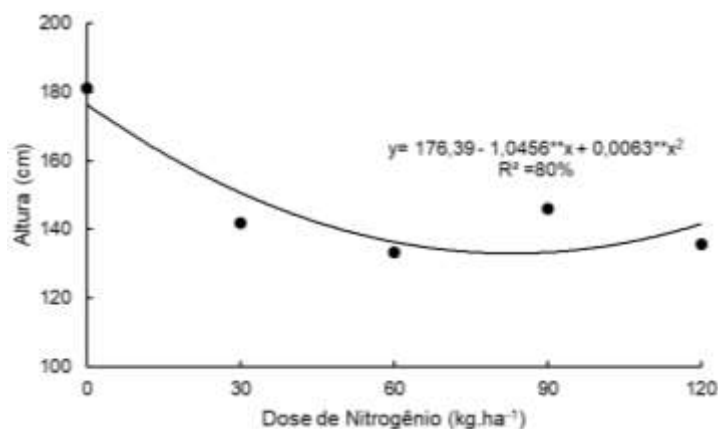
O aumento nas doses de nitrogênio resultou em um incremento linear nos índices de clorofila, alcançando os valores máximos de CLA (31,68), CLB (11,20) e CLT (42,88) com a aplicação de 120 kg ha^{-1} de N (Figura 5). Em relação ao controle, essa dose proporcionou aumentos de 34,12%, 71% e 42,14% para a clorofila a, b e total, respectivamente.

Figura 5. Índice de clorofila a, b e total em plantas de sorgo em função de doses de nitrogênio (kg ha^{-1}). ** Significativo ($p < 0,01$), segundo teste F.



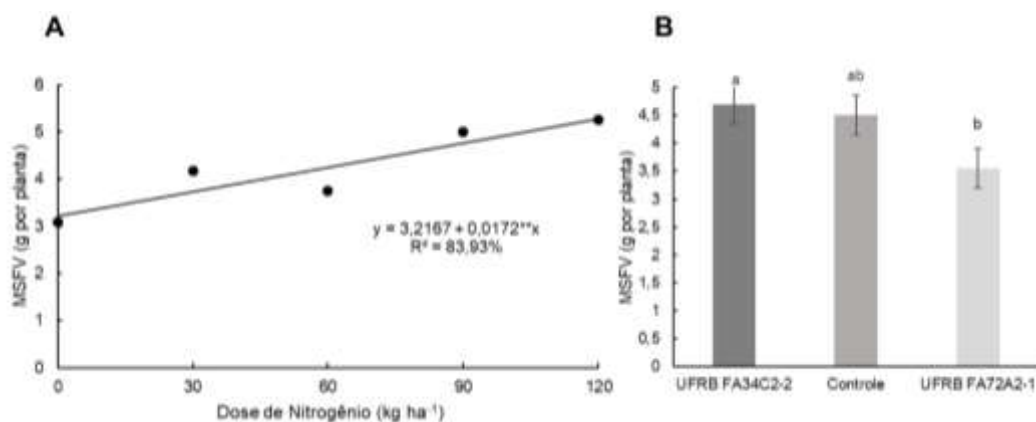
A variável ALT ajustou-se a um modelo quadrático em função das doses de nitrogênio, diminuindo com o aumento na aplicação de N. A altura máxima de 181,24 cm foi observada no tratamento sem aplicação de nitrogênio, enquanto a menor altura estimada, de 133 cm, foi atingida com a dose de 83 kg ha^{-1} (Figura 6).

Figura 6. Altura de plantas de sorgo (cm) em função de doses de nitrogênio (kg ha⁻¹). ** Significativo ($p < 0,01$), segundo teste F.



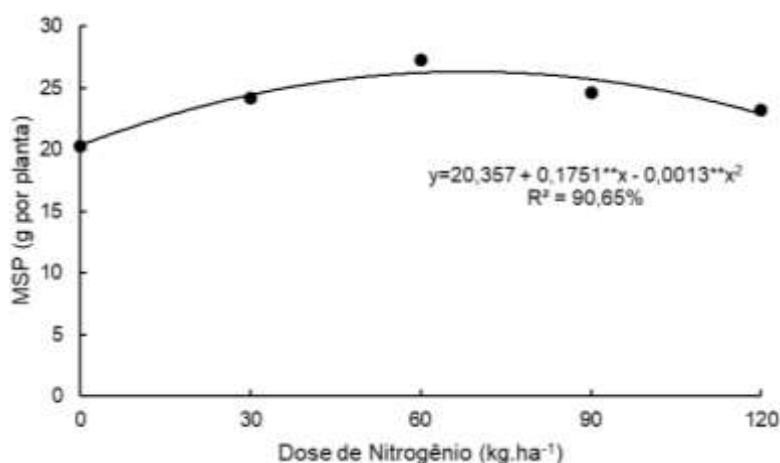
Em relação à MSFV, houve um acréscimo linear com coeficiente angular de 0,0172 que mostra um acréscimo pequeno, mas constante (Figura 7A). O maior valor de massa seca de folhas verdes (5,25 g planta⁻¹) foi alcançado com a dose de 120 kg ha⁻¹, isso representa um aumento de aproximadamente 68% em relação a dose de 0,0 kg ha⁻¹. A inoculação de UFRB FA34C2-2 foi estatisticamente superior à UFRB FA72A2-1 em relação a esta variável, no entanto o tratamento controle não diferiu dos tratamentos com bactérias (FIGURA 7B).

Figura 7. (A) Massa seca de folhas verdes de plantas de sorgo em função de doses de nitrogênio (kg ha⁻¹). ** Significativo ($p < 0,01$), segundo o teste F. (B) Massa seca de folhas verdes (g planta⁻¹) de plantas de sorgo em função da inoculação com as estirpes UFRB FA72A2-1, UFRB FA34C2-2 e controle sem inoculação. Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre si (Teste Tukey, $p < 0,05$).



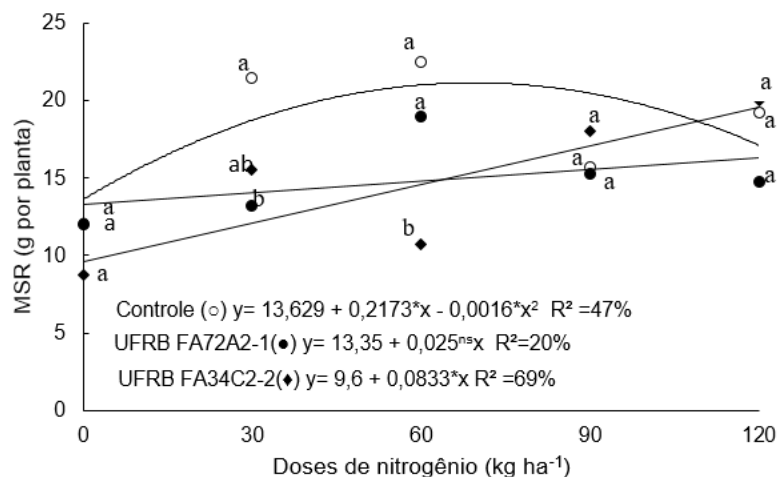
Os dados de MSP em função das doses de nitrogênio resultaram em um efeito quadrático (Figura 8). O aumento na dose de nitrogênio inicialmente resulta em um aumento na MSP até um ponto máximo, após o qual doses maiores começam a reduzir os valores. A dose de nitrogênio estimada para obter a massa seca de panícula máxima é aproximadamente 67,35 kg ha⁻¹. A massa seca de panícula máxima estimada para essa dose é 26,25 (g por planta).

Figura 8. Massa seca de panícula de plantas de sorgo em função de doses de nitrogênio (kg ha⁻¹). ** Significativo ($p < 0,01$), segundo teste F.



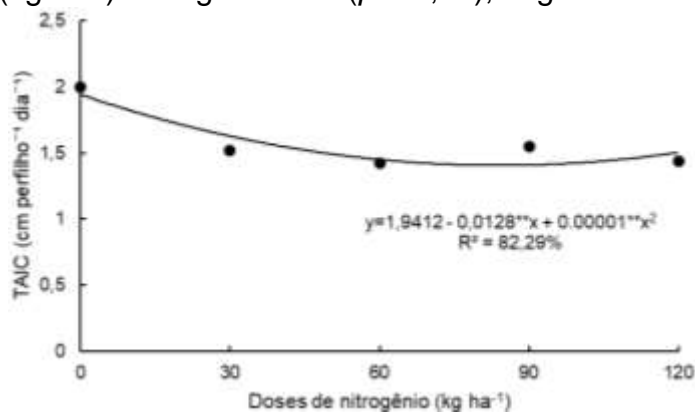
Observou-se uma interação ($p < 0,05$), entre as doses de nitrogênio e a inoculação das estirpes para a variável MSR (Figura 9). O tratamento controle (sem inoculação) apresentou comportamento quadrático, com aumento da MSR até a dose de aproximadamente 60 kg ha⁻¹ de N, atingindo o valor máximo de 22,5 g por planta. Por outro lado, a inoculação com a estirpe UFRB FA34C2-2 exibiu incremento linear na MSR à medida que as doses de nitrogênio foram elevadas, partindo de 9,6 g por planta sem adubação até alcançar valores próximos a 20 g por planta na dose de 120 kg ha⁻¹. Os testes de comparação de médias revelaram que, nas doses de 30 e 60 kg ha⁻¹, o controle apresentou as maiores médias de MSR, diferindo estatisticamente dos tratamentos inoculados, especialmente da estirpe FA34C2-2, que obteve os menores valores.

Figura 9. Massa seca de raiz de plantas de sorgo em função da interação entre as estirpes UFRB FA72A2-1 e UFRB FA34C2-2 e controle sem inoculação, e doses de nitrogênio (kg ha^{-1}). Médias seguidas pela mesma letra minúscula dentro de cada dose de nitrogênio não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). * Significativo ($p < 0,05$), segundo o teste F.



Diferenças significativas foram verificadas para as variáveis morfológicas, taxa de alongamento de colmo (TAIC) e duração de vida das folhas (DVF) em função das doses de nitrogênio aplicadas. A taxa de alongamento do colmo (TAIC) foi influenciada pelas doses de nitrogênio, apresentando comportamento quadrático (Figura 10). Verificou-se que a maior TAIC foi observada na ausência de adubação nitrogenada ($1,999 \text{ cm perfilho}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), com decréscimo até a dose de 60 kg ha^{-1} ($1,42 \text{ cm perfilho}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), que foi a menor média registrada.

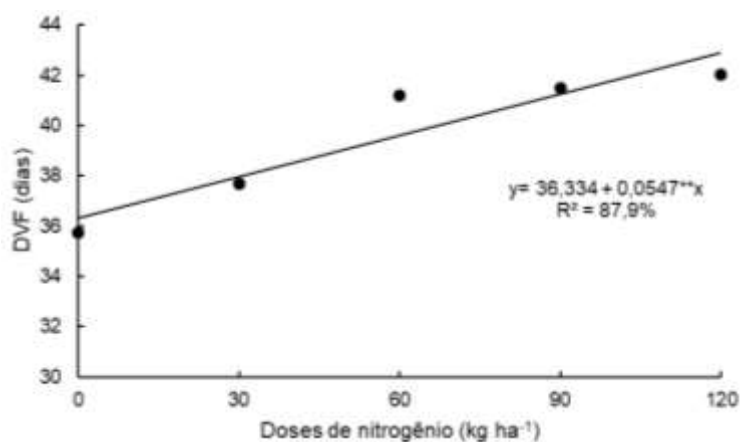
Figura 10. Taxa de alongamento de colmo de plantas de sorgo em função de doses de nitrogênio (kg ha^{-1}). ** Significativo ($p < 0,01$), segundo teste F.



A duração da vida das folhas (DVF) do sorgo aumentou de forma linear em resposta à elevação das doses de nitrogênio (Figura 11). A média da DVF variou

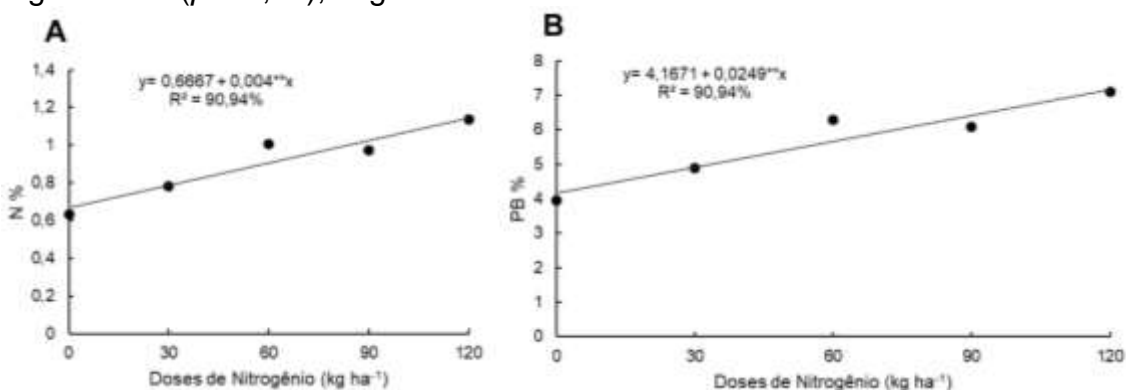
de 35,72 dias, no tratamento controle, para 42,03 dias na dose de 120 kg ha⁻¹ de N, representando um acréscimo de aproximadamente 17,7%. Entre as doses de 0 e 60 kg ha⁻¹, a DVF aumentou cerca de 15,3%, enquanto entre 60 e 120 kg ha⁻¹ o incremento foi de 2,1%.

Figura 11. Duração de vida das folhas de plantas de sorgo em função de doses de nitrogênio (kg ha⁻¹). ** Significativo ($p < 0,01$), segundo teste F.



Houve efeito das doses de nitrogênio tanto para o teor de N (N%) quanto para o de proteína bruta (PB) ($p < 0,01$), com incremento linear à medida que se aumentaram as doses (Figura 12A). O teor de N variou de 0,63% na dose 0 kg ha⁻¹ para 1,13% na dose de 120 kg ha⁻¹, enquanto o teor de PB aumentou de 3,95% para 7,09% nas mesmas doses (Figura 12B).

Figura 12. (A) Teor de nitrogênio de plantas de sorgo em função de doses de nitrogênio (kg ha⁻¹). ** Significativo ($p < 0,01$), segundo o teste F. (B) Proteína bruta de plantas de sorgo em função de doses de nitrogênio (kg ha⁻¹). ** Significativo ($p < 0,01$), segundo teste F.



4. DISCUSSÃO

Os resultados obtidos evidenciaram que o fornecimento de nitrogênio exerceu influência no crescimento do sorgo. Nos experimentos I e II, esse efeito foi observado pelo incremento dos índices de clorofila e pelo aumento do acúmulo de proteína bruta na biomassa. Verificou-se uma resposta linear positiva nos índices de clorofila a, clorofila b e clorofila total em função das doses de nitrogênio, indicando maior capacidade fotossintética das plantas em resposta à adubação nitrogenada.

Há uma estreita relação entre o teor de clorofila e o conteúdo de nitrogênio nas folhas, o que sugere maior capacidade fotossintética em resposta à adubação nitrogenada. Essa correlação é esperada, uma vez que a molécula de clorofila contém nitrogênio, elemento essencial para a formação e funcionamento do aparato fotossintético (KINOSE et al., 2025). Em plantas C4, como o sorgo, estima-se que aproximadamente 30% do nitrogênio foliar seja alocado em componentes dos tilacoides, incluindo as clorofilas (GHANNOUM et al., 2005; BASSI; MENOSSI; MATTIELO, 2018). Esses resultados corroboram com os achados de Zhao et al. (2013), que observaram que a deficiência de nitrogênio reduziu o índice de clorofila, a área foliar e o teor de proteína bruta no híbrido de sorgo DK 44C, comprometendo o acúmulo de matéria seca.

O aumento nas doses de nitrogênio resultou em elevação dos teores de nitrogênio foliar e, conseqüentemente, no teor de proteína bruta, indicadores diretamente relacionados à qualidade nutricional da forragem, conforme também relatado por Chaudhary et al. (2018) e Ostmeyear et al. (2024). No experimento I, os valores máximos dos teores de N e proteína bruta foram registrados nas doses de 107 e 95 kg ha⁻¹, respectivamente. Nessa condição, o teor de N% aumentou em 69% (de 1,57 para 2,65%) e o de PB em 64% (de 9,82 para 16,14%), em comparação ao tratamento sem adubação nitrogenada. No experimento II, também foram observados aumentos expressivos, com elevação de aproximadamente 79,4% no N% (de 0,63 para 1,13%) e de 79,5% na PB (de 3,95 para 7,09%), sendo os maiores valores registrados na dose de 120 kg ha⁻¹.

O nitrogênio é um macronutriente essencial para a cultura do sorgo, atuando como componente estrutural de aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos e clorofila, sendo diretamente responsável por processos fisiológicos fundamentais,

como a fotossíntese, a síntese proteica e o crescimento vegetativo (TAIZ et al., 2017). Diversos estudos têm demonstrado que o sorgo responde positivamente à adubação nitrogenada, com aumentos significativos na produção de matéria seca, teores de clorofila e acúmulo de proteína bruta na parte aérea (LI et al., 2018; SHEHAB et al., 2021; AHMAD et al., 2022). Contudo, o uso excessivo desse nutriente pode resultar em desequilíbrios nutricionais, redução da eficiência de uso do N e impactos ambientais, como a lixiviação de nitrato (FAGERIA; BALIGAR; JONES, 2011). Dessa forma, o manejo adequado da adubação nitrogenada é fundamental para maximizar a eficiência agrônômica do nutriente, assegurando altos rendimentos com menor impacto ambiental e redução no custo de produção.

No experimento II, a altura das plantas aos 90 dias foi reduzida com o aumento das doses de nitrogênio (Figura 6). Esse comportamento é consistente com os dados de Pannacci e Bartolini (2018), que relataram maior altura em plantas da variedade H133 cultivadas sem adubação nitrogenada. Essa resposta pode estar relacionada ao desequilíbrio hormonal causado pelo excesso de nitrogênio, especialmente no tocante às auxinas, cuja produção ou atividade pode ser inibida em condições de elevada disponibilidade de N. Tal desequilíbrio hormonal compromete o alongamento celular, afetando negativamente o crescimento do caule (FU et al., 2022; WANG et al., 2024). De forma semelhante, Pereira et al. (2014) e Góes et al. (2011) não observaram efeito significativo da adubação nitrogenada sobre a altura de plantas ou diâmetro do colmo em diferentes genótipos de sorgo, sugerindo que essas variáveis podem ser pouco responsivas ao N em determinadas condições.

Com relação à massa seca da matéria morta (MSMM), os efeitos da adubação nitrogenada foram distintos entre os experimentos. No experimento I, a variável foi influenciada pelo tratamento (Figura 2), em que o aumento das doses de N reduziu a MSMM. A redução da MSMM em resposta a adubação nitrogenada pode estar associada ao estímulo promovido pelo N no crescimento e dossel forrageiro, favorecendo a produção de tecidos jovens e a manutenção de folhas ativas por mais tempo no perfilho (SILVA et al., 2015; ALVES et al., 2019). Além disso, esse nutriente atua diretamente na intensificação da taxa de alongamento e aparecimento foliar, promovendo maior atividade fotossintética e retarda a senescência foliar (WU et al., 2012; PANOZZO et al., 2025). A redução de 47,3% na massa seca de material morto (MSMM) com o aumento das doses de N reforça

essa interpretação, indicando menor senescência e maior alocação de biomassa em tecidos ativos (OLSON et al., 2013; TANG et al., 2018).

A interação entre as doses de nitrogênio e a inoculação com as estirpes *Bacillus cereus* UFRB FA72A2-1 e *Achromobacter spanius* UFRB FA34C2-2 não resultou em aumento significativo na massa seca da forragem verde (MSFV), no experimento I. Essa ausência de resposta pode estar relacionada à disponibilidade de N no solo, especialmente quando o fornecimento de N mineral atende plenamente às necessidades da planta. Em condições de alta disponibilidade de nitrogênio, as plantas tendem a priorizar a absorção na forma mineral, reduzindo a dependência da fixação biológica (LI et al. 2019). Além disso, fatores como a compatibilidade planta-microrganismo, a microbiota nativa do solo e as condições ambientais podem influenciar significativamente os efeitos da inoculação (SILVEIRA et al., 2016). Estudos como o de Schumacher et al. (2021) também relataram ausência de resposta à inoculação com *Azospirillum brasilense* em híbrido de sorgo AG2005.

Em relação às variáveis morfogênicas, a maior TAIC observada na ausência de nitrogênio pode estar associada a uma estratégia de crescimento vertical em busca de luz, comum em condições de estresse nutricional, como forma de compensar a limitação de recursos (BROADLEY et al., 2000; BINOTTO et al., 2010). Em relação à duração da vida das folhas (DVF) do sorgo, os resultados obtidos estão em consonância com estudos que evidenciam o papel essencial do nitrogênio no retardamento da senescência foliar (WU et al., 2012; SILVA et al., 2015; ALVES et al., 2019; PANOZZO et al., 2025). A deficiência desse nutriente acelera a degradação da clorofila e de proteínas, comprometendo a manutenção da atividade fotossintética e reduzindo o tempo funcional das folhas (FARHAN et al., 2024; WANG et al., 2024).

Por outro lado, no experimento II, a aplicação de 120 kg ha⁻¹ de N resultou nos maiores valores de MSFV, reforçando a resposta positiva do sorgo à adubação nitrogenada em solos de fertilidade moderada. A massa seca de folhas verdes (MSFV) teve um acréscimo de aproximadamente 68% (de 3,13 para 5,25 g por planta). A estirpe UFRB FA34C2-2 apresentou desempenho superior à UFRB FA72A2-1, embora não tenha diferido significativamente do controle, o que sugere uma atuação benéfica potencial, porém dependente do contexto genotípico e edáfico. Esses resultados estão em consonância com os de Crawford, Shroff e

Pargi (2018), que observaram máximos rendimentos de biomassa em sorgo forrageiro da variedade Cofs-29 com 120 kg ha⁻¹ de N.

A produção de panículas também se mostrou sensível às doses de N. No presente estudo, a maior massa seca de panícula (27,25 g) foi obtida com a dose de 60 kg ha⁻¹ no experimento II, o que está de acordo com Baranovsky et al. (2020), que observaram maior peso de panícula com essa mesma dose em sorgo granífero. Em contrapartida, doses mais elevadas (150 e 200 kg ha⁻¹) provocaram redução na produção de panículas por planta, conforme relatado por Ahmad et al. (2022), o que foi atribuído à menor exigência do genótipo avaliado, indicando que doses elevadas podem ser ineficientes ou até prejudiciais, dependendo da cultivar utilizada. Em termos de alocação de biomassa, Pannacci e Bartolini (2018) destacaram que apenas colmos e panículas apresentaram variação significativa entre as taxas de N aplicadas, reforçando o elevado potencial do sorgo na produção de biomassa mesmo na ausência de fertilização nitrogenada.

Embora a inoculação bacteriana não tenha afetado diretamente as variáveis produtivas, influenciou de forma diferenciada a absorção de nutrientes pelas plantas, resultando em efeito significativo sobre a concentração de fósforo (P) e potássio (K) nas plantas. Os tratamentos com as estirpes UFRB FA72A2-1 e UFRB FA34C2-2 proporcionaram aumentos de até 22,7% no teor de K em relação ao controle, enquanto o teor de P foi mantido elevado com FA72A2-1, indicando ação potencial das bactérias na solubilização e disponibilização de nutrientes (BRAULIO, 2023). Microrganismos promotores de crescimento, especialmente aqueles com capacidade de solubilizar minerais (SETHI et al., 2021) ou produzir fitohormônios (HE et al., 2019; KHATOON et al., 2020), podem favorecer o desenvolvimento radicular (HERMES et al., 2022), e, conseqüentemente, aumentar a eficiência de absorção de nutrientes como o K (FLORENTINO et al., 2017).

No caso da massa seca das raízes (MSR), embora tenha havido interação significativa entre inoculação e as doses de N, o maior valor foi registrado no tratamento sem inoculação, no experimento II. Tal resultado pode parecer contraditório, dado que as estirpes avaliadas apresentam capacidade de fixação biológica de N e produção de auxinas (SOUSA, 2017; BRAULIO, 2023; ANTUNES et al., 2017). Contudo, a disponibilidade de N mineral pode ter inibido a colonização e ação efetiva dessas bactérias.

É importante destacar que a eficiência da FBN em gramíneas pode ser limitada por diversos fatores, entre os quais o perfil nutricional do solo se sobressai como determinante (CARVALHO et al., 2014). Neste estudo, o fornecimento de nutrientes foi ajustado conforme as exigências da cultura, o que possivelmente restringiu a expressão dos efeitos da inoculação. Araújo et al. (2014) também observaram ausência de resposta à inoculação com *Herbaspirillum seropedicae* em milho cultivado em solo fértil. Oliveira et al. (2003) relataram que a inoculação da cana-de-açúcar foi mais efetiva em solos de baixa fertilidade e que o genótipo da planta influenciou diretamente a eficiência da simbiose.

Em condições semelhantes, Soares et al. (2021) verificaram que o sorgo Ranchero, cultivado em solo argiloso de fertilidade média, não apresentou ganhos de produtividade com fertilização nitrogenada nem com a inoculação com *Azospirillum brasilense*. Do mesmo modo, Santos et al. (2017) e Maia et al. (2017) relataram ausência de resposta à adubação e à inoculação em diferentes genótipos de sorgo. Em cultivares mais exigentes, como o sorgo AG 1085, houve aumento na produção de matéria seca com doses de 100 a 200 kg ha⁻¹, indicando que a resposta ao N pode ser cultivar-dependente (CARVALHO et al., 2022).

Os resultados deste estudo evidenciam que a resposta do sorgo à adubação nitrogenada e à inoculação com bactérias promotoras de crescimento é multifatorial, sendo influenciada pelo genótipo, pela fertilidade do solo e pelas condições ambientais. Embora os microrganismos testados apresentem potencial para contribuir com a FBN e o fornecimento de fitohormônios, sua eficácia foi limitada nas condições avaliadas. Dessa forma, são necessários novos estudos em ambientes de menor fertilidade e com diferentes cultivares para melhor compreender o potencial agrônômico dessas interações.

4. CONCLUSÕES

Adubação nitrogenada exerceu efeito positivo sobre as variáveis morfofisiológicas e nutricionais do sorgo, especialmente nos índices de clorofila, na massa seca de folhas verdes e nos teores de nitrogênio e proteína bruta em ambos os experimentos, com destaque para doses entre 90 e 120 kg ha⁻¹ de N, que proporcionaram os maiores incrementos. As estirpes *Bacillus cereus* UFRB

FA72A2-1 e *Achromobacter spanius* UFRB FA34C2-2 não apresentaram efeito relevante na promoção do crescimento da cultura em solo de fertilidade moderada.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASFAR, A.; BAKRI, Y.; ZADRAK, M.; HASSAN, H.; SOUCCAR, Y. Nitrogen fixing *Azotobacter* species as potential soil biological enhancers for crop nutrition and yield stability. **Frontiers in Microbiology**, v. 12, p. 628379, 2021.

AHMAD, I.; KHAN, S.; SHAH, Z.; NOOR, S.; AHMAD, H. Effect of N on growth, antioxidant capacity, and chlorophyll content of sorghum. **Agronomy**, v. 12, n. 2, p. 501, 2022.

ALVES, L. C., SANTOS, M. E. R., PEREIRA, L. E. T., DE CARVALHO, A. N., ROCHA, G. D. O., CARVALHO, B. H. R.; VASCONCELO, K. A.; ÁVILA, A. B. Morphogenesis of age groups of *Marandu palisade* grass tillers deferred and fertilised with nitrogen. **Semina Ciências Agrárias**, v. 40, n. 6, p. 2683-2692, 2019.

ANTUNES, G. R.; SANTANA, S. R. A.; ESCOBAR, I. E. C.; BRASIL, M. S.; ARAÚJO, G. G. L.; VOLTOLINI, T. V.; FERNANDES-JUNIOR, P. I. Associative diazotrophic bacteria from forage grasses in the Brazilian semi-arid region are effective plant growth promoters. **Crop and Pasture Science**, v. 70, n. 10, p. 899-907, 2019.

AQUINO, J. P. A.; SILVA, J. R. A.; OLIVEIRA, R. P.; FREITAS, M. S. M.; SANTOS, C. E. R.; ALMEIDA, A. Q. Plant growth-promoting bacteria improve growth and nitrogen metabolism in maize and sorghum. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 33, n. 3, p. 249-260, 2021.

ARAÚJO, E. O.; SILVA, M. A.; BORGES, W. L. B.; FREITAS, R. S.; SOUZA, F. R. B. Inoculation of *Herbaspirillum seropedicae* in three corn genotypes under different nitrogen levels. **African Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 21, p. 1628-1634, 2014.

BALAKRISHNA, D.; KRISHNA, M. L.; KUMAR, A. Tissue culture and genetic transformation in *Sorghum bicolor*. In: Breeding Sorghum for Diverse End Uses. **Woodhead Publishing**, 2019. p. 115-130.

BARANOVSKY, A. V.; GAGARIN, A. A.; KIRILLOV, V. A.; PRIGOROVSKAYA, M. A. The effect of nitrogen fertilizers on the productivity of grain sorghum. **Bioscience Research**, v. 17, n. 1, p. 228-234, 2020.

BARLOG, P.; GRZEBISZ, W.; LUKOWIAK, R. Fertilizers and fertilization strategies mitigating soil factors constraining efficiency of nitrogen in plant production. **Plants**, v. 11, n. 14, p. 1855, 2022.

BARROS, B. G. F.; FREITAS, A. D. S.; TABOSA, J. N.; LYRA, M. C. C. P.; MERGULHÃO, A. C. E. S.; SILVA, A. F.; OLIVEIRA, W. S.; FERNANDES-JUNIOR,

P. I.; SAMPAIO, E. V. S. B. Biological nitrogen fixation in field-grown sorghum under different edaphoclimatic conditions is confirmed by N isotopic signatures. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 117, p. 93-101, 2020.

BASSI, D.; MENOSSI, M.; MATTIELLO, L. Nitrogen supply influences photosynthesis establishment along the sugarcane leaf. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 2327, 2018.

BERGAMASCHI, C.; ROESCH, L. F. W.; QUADROS, P. D.; CAMARGO, F. A. O. Ocorrência de bactérias diazotróficas associadas a cultivares de sorgo forrageiro. **Ciência Rural**, v. 37, p. 727-733, 2007.

BINOTTO, A. F.; LÚCIO, D. A.; LOPES, S. J. Correlations between growth variables and the DICKSON quality index in forest seedlings. **Cerne**, v.16, n.4, p.457- 464, 2010.

BRAULIO, C. S. **Microrganismos na promoção de crescimento de feijão-caupi e maracujazeiro e no controle de fusariose**. 2023. 147 f. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias: Agricultura Tropical) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2023.

BUSO, W. H. D.; MORGADO, H. S.; SILVA, L. B.; FRANÇA, A. F. S. Utilização do sorgo forrageiro na alimentação animal. **PUBVET**, v. 5, n. 23, p. 1-6, 2011.

BROADLEY, M. R.; ESCOBAR-GUTIÉRREZ, A. J.; BURNS, A.; BURNS, I. G. What are the effects of nitrogen deficiency on growth components of lettuce?. **New Phytologist**, v. 2000147, n. 3, p. 519 - 526, 2000.

CARVALHO, F. H.; SILVA, J. L.; OLIVEIRA, A. R.; SANTOS, V. G.; PEREIRA, M. L.; ALMEIDA, T. de; RODRIGUES, D. A. Nitrogen availability in grain sorghum under Cerrado conditions. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 8, p. e57611831306–e57611831306, 2022.

CARVALHO, T. L. G.; BALSEMÃO-PIRES, E.; SARAIVA, R. M.; FERREIRA, P. C. G.; HEMERLY, A. S. Nitrogen signalling in plant interactions with associative and endophytic diazotrophic bacteria. **Journal of Experimental Botany**, v. 65, n. 19, p. 5631–5642, 2014.

CATALDO, D. A.; HARO, R. A.; SHENKER, M.; ZAHNER, R. Rapid caulerimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 6, p. 71-80, 1975.

CHAUDHARY, J. D.; PAVAYA, R. P.; MALAV, J. K.; DIPIKA, G.; CHAUDHARY, N.; KUNIYA, N. K.; VINA A.; PATEL, I. M.; JAT, J. R. Effect of nitrogen and potassium on yield, nutrient content and uptake by forage sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) on loamy sand. **International Journal of Chemical Studies**, v. 6, n. 2, p. 761-765, 2018.

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

CRAWFORD, S. A., SHROFF, J. C.; PARGI, S. B. Effect of nitrogen levels and cutting management on growth and yield of multicut forage sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] variety cofs-29. **International Journal of Agricultural Sciences**, v. 14, n. 1, p. 118-122, 2018.

DHAWI, F.; DATTA, R.; RAMAKRISHNA, W. Proteomics provides insights into biological pathways altered by plant growth promoting bacteria and arbuscular mycorrhiza in sorghum grown in marginal soil. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Proteins and Proteomics**, v. 1865, n. 2, p. 243-251, 2017.

EL-MEIHY, R. M.; ABOU-ALY, H. E.; YOUSSEF, A. M.; TEWFIKE, T. A.; EL-ALKSHAR, E. A. Efficiency of heavy metals-tolerant plant growth promoting bacteria for alleviating heavy metals toxicity on sorghum. **Environmental and Experimental Botany**, v. 162, p. 295–301, 2019.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. Growth and mineral nutrition of field crops. 3. ed. **Boca Raton: CRC Press**, 2011. 586 p.

FARHAN, M.; SATHISH, M.; KIRAN, R.; MUSHTAQ, A.; BAAZEEM, A.; HASNAIN, A.; HAKIM, F.; NAQVI, S. A.; MUBEEN, M.; IFTIKHAR, Y.; ABBAS, A.; ZEESHAN, H.; MOUSTAFA, M.; MOUSTAFA, M. Plant Nitrogen Metabolism: Balancing Resilience to Nutritional Stress and Abiotic Challenges. **Phyton**, v. 93, n. 3, 0031-9457, 2024.

FU, Y. F.; YANG, X. Y.; ZHANG, Z. W.; YUAN, S. Synergistic effects of nitrogen metabolites on auxin regulating plant growth and development. **Front Plant Sci**, v. 13, p. 1098787, 2022.

FLORENTINO, L.A; REZENDE, A.V.; MIRANDA, C.C.B.; MESQUITA, A.C.; MANTOVANI, J.R.; BIANCHINI, H.C. Potassium solubilization in phonolite rock by diazotrophic bacteria. **Comunicata Scientiae**, v.8, n.1, p.17-23, 2017.

GHANNOUM, O.; VON CAEMMERER, S.; ZISKA, L. H.; PEARCY, R. W. Faster Rubisco is the key to superior nitrogen-use efficiency in NADP-malic enzyme relative to NAD-malic enzyme C₄ grasses. **Plant Physiology**, v. 137, n. 2, p. 638–650, 2005.

GÓES, R. J.; SILVA, A. G.; MOURA, J. M. A.; CARDOSO, M. J.; COSTA, R. V. Fontes e doses de nitrogênio em cobertura, no sorgo granífero na safrinha. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 10, n. 2, p. 121-129, 2011.

GÓES, B. C.; MEDEIROS, A. C. F.; COSTA, A. C. S.; FARIAS, M. S.; MOURA, L. M. Systematic bibliographical review of scientific publications on the use of millet and sorghum as vegetable cover. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 28, p. 78-88, 2020.

HE, Y.; PANTIGOSO, H.A.; WU, Z.; VIVANCO, J.M. Co-inoculation of *Bacillus* sp. and *Pseudomonas putida* at different development stages acts as a biostimulant to promote growth, yield and nutrient uptake of tomato. **Journal of Applied Microbiology**, v.127, n.1, p.196-207, 2019.

HERMS, C .H.; HENNESSY, R. C.; BAK, F.; DRESBØLL, D. B.; NICOLAISEN, M. H. Back to our roots: exploring the role of root morphology as a mediator of beneficial plant–microbe interactions. **Environmental Microbiology**, v.24, n.8, p.3264-3272, 2022.

ISMAEIL, F.; AHMED, S. E.; JABERELDAR, A. A.; AHMED, E. E. B. M.; HASSAN, M. B. Effect of different nitrogen levels on yield and quality of forage sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench cv. Abusabien). **Asian Journal of Advances in Agricultural Research**, v. 24, n. 7, p. 28-38, 2024.

KHATOON, Z.; HUANG, S.; RAFIQUE, M.; FAKHAR, A.; KAMRAN, M.A.; SANTOYO, G. Unlocking the potential of plant growth-promoting rhizobacteria on soil health and the sustainability of agricultural systems. **Journal of Environmental Management**, v. 273, 2020.

KINOSE, Y.; AOKI, T.; MATSUMOTO, M.; LI, J.; ARIURA, R.; FUSE, T.; IZUTA, T. Effects of ozone on leaf nitrogen assimilation and nitrogen utilization in photosynthetic apparatus of *Fagus crenata* seedlings grown under different atmospheric CO₂ and soil nitrogen conditions. **Environmental and Experimental Botany**, p. 106098, 2025.

KHALIFA, M.; ELTAHIR, E. A. B. Assessment of global sorghum production, tolerance, and climate risk. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 7, p. 1184373, 2023.

KHAWAJA, C.; ALI, M.; AHMAD, I.; HUSSAIN, M.; FAROOQ, A. Energy Sorghum: An Alternative Energy Crop: A Handbook. **WIP Renewable Energies**, 2014. Disponível em: <http://oar.icrisat.org/9049/>. Acesso em: 03 jan. 2024.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes. Wallmap 150cmx200cm, 1928.

LI, J.; SHI, Y.; VEERANAMPALAYAM-SIVAKUMAR, A. N.; SCHACHTMAN, D. P. Elucidating sorghum biomass, nitrogen and chlorophyll contents with spectral and morphological traits derived from unmanned aircraft system. **Frontiers in plant science**, n. 9, p. 1406, 2018.

LI, Y.; LI, Y.; ZHANG, H.; WANG, M.; CHEN, S. *Paenibacillus beijingensis* BJ-18 diazotrófico fornece nitrogênio para a planta e promove seu crescimento, absorção e metabolismo. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, p. 1119, 2019.

MAHMUD, K.; CHEN, D.; DAI, Z.; XU, J.; FAN, J. Current progress in nitrogen fixing plants and microbiome research. **Plants**, v. 9, n. 1, p. 97, 2020.

MAIA, C. P.; SANTOS, M. S.; SOUSA, G. G.; OLIVEIRA, R. R.; LIMA, R. A. Caracteres produtivos de sorgo híbrido SS-318 submetido a doses de nitrogênio. **Revista Agroecossistemas**, v. 9, n. 2, p. 53-65, 2017.

NAKAO, A. H.; SANTOS, R. D.; PEREIRA, D. H.; PEREIRA, M. G.; ZUFFO, A. M. Intercropping *Urochloa brizantha* and sorghum inoculated with *Azospirillum brasilense* for silage. **Revista Ciência Agronômica**, v. 49, n. 3, p. 501-511, 2018.

OLIVEIRA, A. L. M.; CANDEIA, J. A.; OLIVEIRA, R. C.; DOBEREINER, J.; BALDANI, J. I. Response of micropropagated sugarcane varieties to inoculation with endophytic diazotrophic bacteria. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 34, p. 59-61, 2003.

OLIVEIRA, E. P.; SANTOS, J. D. O.; MELO, C. S.; OLIVEIRA, A. L. M.; CARVALHO, T. L. G. Humic substances and plant growth-promoting bacteria enhance corn (*Zea mays* L.) development. **South African Journal of Botany**, v. 166, p. 539–549, 2024.

OLSON, S. N.; RITTER, K.; MEDLEY, J.; WILSON, T.; ROONEY, W. L.; MULLET, J. E. Energy sorghum hybrids: Functional dynamics of high nitrogen use efficiency. **Biomass and Bioenergy**, v. 56, p. 307-316, 2013.

OSTMEYER, T. J.; IMPA, S. M.; PEIRIS, K. H.; BEAN, S. R.; RITCHIE, G.; KRISHNA JAGADISH, S. V. Grain protein and amino acid dynamics in sorghum with in-season split-nitrogen application. **Cereal Chemistry**, v. 101, n. 4, p. 833-846, 2024.

PANOZZO, A.; BOLLA, P. K.; BARION, G.; BOTTON, A.; VAMERALI, T. Regulação fito-hormonal da tolerância ao estresse abiótico, senescência foliar e resposta à produtividade em culturas de campo: uma revisão abrangente. **BioTech**, v. 14, n. 1, 14, 2025.

PANNACCI, E.; BARTOLINI, S. Effect of nitrogen fertilization on sorghum for biomass production. **Agronomy Research**, v. 16, n.5, p. 2146-2155, 2018.

PATTERSON, T.; KLINGBORG, D. J.; COCHRAN, R. C.; TITGEMEYER, E. C.; WALTERS, D. T. Evaluation of the 1996 beef cattle NRC model predictions of intake and gain for calves fed low or medium energy density diets. **Nebraska Beef Report MP 73-A**, p. 26–29, 2000.

PEREIRA, R. G.; SOUZA, C. A. A.; COSTA, N. D.; OLIVEIRA, F. H. T.; FREITAS, A. D. S. Rendimento do sorgo granífero adubado com nitrogênio e fósforo no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 13, n. 3, p. 284-299, 2014.

PINHO, R. M. A.; RODRIGUES, J. A. S.; ROCHA, J. R. A. S.; REZENDE, A. V.; RODRIGUES, I. de A. *Sorghum* cultivars of different purposes silage. **Ciência Rural**, v. 45, p. 298-303, 2015.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing Vienna**, Austria, 2024. Disponível em: <<http://www.r-project.org>>. Acesso em: 30 jan. 2024.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ VENEGAS, V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: CFSEMG, 1999. 359p.

SANTOS, C. L. R.; ALVES, G. C.; MACEDO, A. V. M.; GIORI, F. G.; PEREIRA, W.; URQUIAGA, S.; REIS, V. Contribution of a mixed inoculant containing strains of *Burkholderia* spp. and *Herbaspirillum* ssp. to the growth of three sorghum genotypes

under increased nitrogen fertilization levels. **Applied Soil Ecology**, v. 113, p. 96-106, 2017.

SANTOS, T. M.; SANTOS, P. M.; BOZORG, V. L. A.; SANTOS, J. G. D.; NETO, J. V. N.; FARIA, A. F. G.; SANTOS, A. C. Morfogênese de híbridos de sorgo para pastejo em função do espaçamento entre linhas. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 19, n. 2, p. 80-85, 2024.

SANTOS, F. C.; OLIVEIRA, A. C.; FREITAS, M. S. M.; NASCIMENTO, A. F. F.; ALMEIDA, A. Q. Adubação nitrogenada e potássica na nutrição e na extração de macronutrientes pelo sorgo biomassa. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 14, n. 1, p. 10–22, 2015.

SILVEIRA, A. P. D.; SALA, V. M. R.; CARDOSO, E. J. B. N.; LABANCA, E. G.; CIPRIANO, M. A. P. Nitrogen Metabolism and Growth of Wheat Plant under Diazotrophic Endophytic Bacteria Inoculation. **Applied Soil Ecology**, v. 107, p. 313–319, 2016.

SHEHAB, A. E. S. A. E.; GUO, Y. Effects of nitrogen fertilization and drought on hydrocyanic acid accumulation and morpho-physiological parameters of sorghums. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 101, n. 8, p. 3355-3365, 2021.

SETHI, D.; SUBUDHI, S.; RAJPUT, V.D.; KUSUMAVATHI. K.; SAHOO, T. R.; DASH, S.; MANGARAJ, S.; NAYAK, D. K.; PATTANAYAK, S. K.; MINKINA, T.; GLINUSCHKIN, A. P.; KALINITCENKO, V. P. Exploring the Role of Mycorrhizal and Rhizobium Inoculation with Organic and Inorganic Fertilizers on the Nutrient Uptake and Growth of *Acacia mangium* Saplings in Acidic Soil. **Forests**, v.12, n.12, p.2-15, 2021.

SILVA, S. C.; SBRISSIA, A. F.; PEREIRA, L. E. T. Ecophysiology of C4 forage grasses—understanding plant growth for optimising their use and management. **Agriculture**, v. 5, n. 3, p. 598-625, 2015.

SCHLEMPER, T. R.; ROSSETTO, P. B.; SILVA, F. G.; LIMA, M. R.; SOUSA, T. J. Effect of *Burkholderia tropica* and *Herbaspirillum frisingense* strains on sorghum growth is plant genotype dependent. **PeerJ**, v. 6, p. e5346, 2018.

SCHUMACHER, L. L.; MACHADO, J. C.; BOTELHO, P. R.; SILVA, J. L.; ROCHA, J. R. A. S. Efeito da inoculação de sementes com *Azospirillum brasilense* sobre o fracionamento nitrogenado e glicídico em silagens de sorgo. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 2, p. e16710212321, 2021.

SILVA, D. J.; QUEIROZ, A. C. **Análise de alimentos (métodos químicos e biológicos)**. 3. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2009. 235 p.

SILVA, F. C.; ABREU, C. A.; BARRIOS, S. C. L.; OLIVEIRA, J. R.; SANTOS, J. Z. R. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. **Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica**; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 627 p.

SILVA, W. L.; BASSO, F. C.; RUGGIERI, A. C.; VIEIRA, B. R.; ALVES, P. L. C. A.; RODRIGUES, J. A. S. Características morfológicas e estruturais de híbridos de

sorgo submetidos a adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 7, n. 4, p. 691-696, 2012.

SOARES, D. A.; ZUFFO, A. M.; SANTOS, R. D.; SOUSA, J. X.; NASCENTE, A. S. Grain sorghum grown as second crop and inoculated with *Azospirillum brasilense* associated with nitrogen fertilization. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 8, n. 3, p. e5117, 2021.

SOUSA, J. X. **Promoção do Crescimento Vegetal por Bactérias Diazotróficas no Feijão-Caupi**. Dissertação (Mestrado em Solos e Qualidade de Ecossistemas) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, Bahia, 2017.

TAIZ, L. ZEIGUER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

TANG, C.; YANG, X.; CHEN, X.; AMEEN, A.; XIE, G. Sorghum biomass and quality and soil nitrogen balance response to nitrogen rate on semiarid marginal land. **Field Crops Research**, v. 215, p. 12-22, 2018.

UCHINO, H.; YOSHIMURA, Y.; UENO, M.; SAITO, T.; SHIBATA, M. Dynamics of fertilizer nitrogen applied to sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) in the semi-arid tropics. **Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ**, v. 49, n. 4, p. 409–418, 2015.

UMAPATHI, M.; SUGANTHI, V.; ARULSELVI, P. *Bacillus* sp. and *Pseudacidovorax intermedius* colonization effect on biochemical and metabolites expression in drought-stressed *Sorghum bicolor* (L.) Moench. **Plant Stress**, v. 11, p. 100424, 2024.

VAN SOEST, P.J. **Nutritional ecology of the ruminant**. 2.ed. New York: Cornell University Press, 1994. 476p.

VENKATESWARAN, K.; RANGASAMY, P.; SIVANESAN, I. Classification, distribution and biology. In: ARUNA, C.; VISARADA, K. B. R. S.; BHAT, B. V.; TONAPI, V. A. (ed.). *Breeding Sorghum for Diverse End Uses*. **Duxford, UK: Woodhead Publishing**, 2019. p. 33–60.

WANG, Q.; Li, S.; LI, J.; HUANG, D. The Utilization and Roles of Nitrogen in Plants. **Forests**, v. 15, n. 7, p. 1191, 2024.

WU, X. Y.; KUAI, B. K.; JIA, J. Z.; JING, H. C. Regulation of leaf senescence and crop genetic improvement F. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 54, n. 12, p. 936-952, 2012.

ZHAO, D.; REDDY, K. R.; KAKANI, V. G.; REDDY, V. R. Nitrogen deficiency effects on plant growth, leaf photosynthesis, and hyperspectral reflectance properties of sorghum. **European Journal of Agronomy**, v. 22, n. 4, p. 391-403, 2005.

Capítulo 3

Crescimento inicial de genótipos de mandioca inoculados com bactérias promotoras de crescimento

Crescimento inicial de genótipos de mandioca inoculados com bactérias promotoras de crescimento

RESUMO: O uso de bioinsumos, como bactérias promotoras de crescimento de plantas (PGPB), associado a diferentes fontes de nitrogênio, constitui uma estratégia sustentável para otimizar o desenvolvimento de culturas agrícolas. Com isso, o objetivo neste estudo foi avaliar o efeito de duas estirpes de PGPB no crescimento inicial de genótipos de mandioca. O experimento foi realizado em casa de vegetação, foram testadas a combinação de quatro genótipos de mandioca (Novo Horizonte, BR 11-34-64, BR 11-34-41 e Poti Branca) e quatro fontes de nitrogênio: duas estirpes de PGPB (*Bacillus cereus* UFRB FA72A2-1 e *Achromobacter spanius* UFRB FA34C2-2) e duas testemunhas (0 e 40 kg ha⁻¹ de N via ureia). Aos 45 dias após o plantio, avaliaram-se altura de planta, diâmetro do caule, número de folhas, teores de clorofila a, b e total, massa seca da parte aérea e de raízes. O genótipo BR 11-34-64 apresentou as maiores diâmetro do colmo, número de folhas, massa seca da parte aérea e também dos índices de clorofila e massa seca de raiz, especialmente quando inoculado com a estirpe *B. cereus* UFRB FA72A2-1. A inoculação, especialmente com a estirpe UFRB FA72A2-1, demonstra potencial para investigações futuras em condições de campo.

Palavras-chave: Inoculantes, *Manihot esculenta*, *Bacillus cereus*, *Achromobacter spanius*.

Initial growth of cassava genotypes inoculated with growth-promoting bacteria

ABSTRACT: The use of bio-inputs, such as plant growth-promoting bacteria (PGPB), associated with different sources of nitrogen, is a sustainable strategy for optimizing the development of agricultural crops. Thus, the objective of this study was to evaluate the effect of two strains of PGPB on the initial growth of cassava genotypes. The experiment was conducted in a greenhouse, testing the combination of four cassava genotypes (Novo Horizonte, BR 11-34-64, BR 11-34-41, and Poti Branca) and four nitrogen sources: two PGPB strains (*Bacillus cereus* UFRB FA72A2-1 and *Achromobacter spanius* UFRB FA34C2-2) and two controls (0 and 40 kg ha⁻¹ of N via urea). Forty-five days after planting, plant height, stem diameter, number of leaves, chlorophyll a, b, and total chlorophyll content, and dry mass of the aerial part and roots were evaluated. The BR 11-34-64 genotype had the largest culm diameter, number of leaves, dry mass of the aerial part, and also chlorophyll indices and dry root mass, especially when inoculated with the *B. cereus* UFRB FA72A2-1 strain. Inoculation, especially with strain UFRB FA72A2-1, shows potential for future research under field conditions.

Keywords: Inoculants, *Manihot esculenta*, *Bacillus cereus*, *Achromobacter spanius*.

1. INTRODUÇÃO

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é alimento básico para cerca de 500 milhões de pessoas em todo o mundo (OTEKURIN, 2024) e atua como importante fator de redução da pobreza, graças à sua resiliência climática e capacidade de cultivo em solos marginais com baixo uso de insumos (IMMANUEL et al., 2024). Em 2023, no Brasil a mandioca foi cultivada em cerca de 1,24 milhões de hectares, alcançando uma produção aproximada de 19,13 milhões de toneladas, com destaque para os estados do Pará e do Paraná como os maiores responsáveis pela safra (CONAB, 2024).

Apesar da adaptação a solos de baixa fertilidade, a mandioca absorve quantidades consideráveis de nutrientes, exportando praticamente tudo o que absorve, com uma mínima devolução na forma de resíduos culturais (BORGES et al., 2020). Essa intensa extração, sobretudo de nitrogênio, o segundo nutriente mais absorvido e exportado pela cultura (HOWELER, 2012), corresponde a cerca de 123 kg N removidos para cada 25 toneladas de raízes colhidas por hectare, dessa forma quando a disponibilidade de N no solo é insuficiente, a produtividade é comprometida (BORGES et al., 2020).

Nesse cenário, a associação da cultura a bactérias promotoras de crescimento vegetal (BPCV) é uma alternativa para otimizar a nutrição da mandioca. Inoculação com *Azospirillum brasilense* aumentaram a absorção de N em 27–40% e melhoraram caracteres agrônômicos da mandioca (FERNANDES et al., 2023; AGUILERA et al., 2022), enquanto o uso de estirpes de *Bacillus* resultou em maiores teores foliares de clorofila, nitrogênio e fósforo na parte aérea (QUEIRÓS et al., 2024).

As BPCV promovem o desenvolvimento vegetal por meio de mecanismos diretos e indiretos, como a fixação biológica de nitrogênio (SANTOS et al., 2017), produção de sideróforos (CEN et al., 2024), atividade de ACC-desaminase (GUPTA; PANDEY, 2019), síntese de fitohormônios como auxinas, giberelinas (UMAPATHI et al., 2024), citocininas (MEKUREYAW et al., 2022), pela solubilização de fósforo (SOUSA, 2017) e também com biocontrole de patógenos (BRAULIO, 2023), incremento na absorção geral de nutrientes (CHENG et al., 2025) e maior tolerância a estresses abióticos (EL-MEIHY et al., 2019). Dessa forma, a aplicação de BPCV pode reduzir custos com fertilizantes químicos e

melhorar a produtividade da mandioca em sistemas agrícolas sustentáveis.

Entretanto, a resposta da cultura a esses bioinsumos não é uniforme entre os materiais genéticos disponíveis. Segundo Queirós et al. (2024), a resposta à inoculação com bactérias promotoras de crescimento varia entre cultivares de mandioca. Considerando essa heterogeneidade, é necessário avaliar as combinações genótipo–microrganismo mais eficientes.

Com base nisso, duas estirpes bacterianas previamente caracterizadas quanto ao seu potencial para promoção de crescimento vegetal foram selecionadas para esse estudo. As estirpes UFRB FA72A2-1 (*Bacillus cereus*) e UFRB FA34C2-2 (*Achromobacter spanius*), descritas por Sousa (2017) e Braulio (2023), destacam-se pelo potencial de fixação biológica de nitrogênio, além da produção de auxinas, proteases e amilases e da solubilização de fósforo e potássio. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito de UFRB FA72A2-1 (*Bacillus cereus*) e UFRB FA34C2-2 (*Achromobacter spanius*) no crescimento inicial de genótipos de mandioca.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O ensaio experimental foi realizado em casa de vegetação da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), no Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas (CCAAB), situada no município de Cruz das Almas (coordenadas 12°40'39" S, 39°06'23" W, com uma altitude de 220 m) no período de 30/09/2024 a 15/11/2024. O clima da região é do tipo Aw, tropical quente e úmido (KÖPPEN; GEIGER, 1928).

O experimento foi conduzido em um delineamento inteiramente casualizado, seguindo um esquema fatorial 4 × 4 com oito repetições. O primeiro fator consistiu nos genótipos de mandioca, Novo Horizonte, BR 11-34-64, BR 11-34-41 e Poti Branca, enquanto o segundo fator incluiu quatro fontes de nitrogênio: as estirpes UFRB FA72A2-1 (*Bacillus cereus*) e UFRB FA34C2-2 (*Achromobacter spanius*), além de duas testemunhas sem inoculação com doses equivalentes a 0 e 40 kg ha⁻¹ de N aplicadas na forma de ureia.

O solo, classificado como Latossolo Amarelo distrocoeso de textura média, foi coletado na Fazenda Experimental do CCAAB, situada no município de Cruz das Almas, Bahia, Brasil, em uma área anteriormente destinada à pastagem que

esteve em pousio por dois anos. A coleta foi realizada na camada subsuperficial (0 a 0,20 m). A caracterização química e física foi conduzida de acordo com as metodologias compiladas pela Embrapa (2011) e os resultados das análises foram: pH (H₂O) = 5,0; M.O = 2,17 dag kg⁻¹; P (Mehlich 1) = 4,53 mg dm⁻³; K = 105,75 mg dm⁻³; Na = 2,0 mg dm⁻³; Ca = 1,09 cmol_c dm⁻³; Mg = 0,83 cmol_c dm⁻³; H + Al = 3,4 cmol_c dm⁻³; SB = 2,19 cmol_c dm⁻³; CTC = 5,59 cmol_c dm⁻³ e V = 39,2%; S = 11,40 mg dm⁻³; B = 0,07 mg dm⁻³; Cu = 0,49 mg dm⁻³; Mn = 11,5 mg dm⁻³; Fe = 51,80 mg dm⁻³; Zn = 9,10 mg dm⁻³. A formulação do substrato para produção de mudas incluiu a mistura do solo com um composto orgânico na proporção de 50:50 (v/v), conforme a recomendação de Jala et al. (2019). O composto orgânico, produzido na UFRB a partir de resíduos de podas de jardinagem e enriquecido com esterco caprino e bovino na proporção de 3:1.

No experimento, as bactérias diazotróficas utilizadas foram UFRB FA72A2-1 (*Bacillus cereus*) e UFRB FA34C2-2 (*Achromobacter spanius*), isoladas de solos com histórico de deposição de maniveira, por Sousa (2017) e identificadas e caracterizadas por Braulio (2023).

Os isolados bacterianos foram cultivados em meio caldo nutriente, composto por 5 g de NaCl, 5 g de peptona, 1,5 g de extrato de carne e 1,5 g de extrato de levedura dissolvidos em 1000 mL de água destilada, sob agitação contínua a 110 rpm, por 72 horas, a 28 °C. A inoculação foi feita a partir da imersão das manivas em suspensão bacteriana com uma densidade de 10⁸ células.ml⁻¹. As manivas-semente foram coletadas no banco de germoplasma da Embrapa Mandioca e Fruticultura e cortadas longitudinalmente em estacas de aproximadamente 5 cm. Antes da inoculação, as estacas foram submersas em uma solução de água sanitária a 20% (hipoclorito de sódio a 2,5%) por 5 minutos para reduzir a carga microbiana. Em seguida, as estacas foram lavadas cinco vezes com água destilada autoclavada para remover o excesso de água sanitária.

Para a instalação do experimento, o solo e o composto orgânico foram secos ao ar, triturados e peneirados em malha de 2 mm. Em seguida, foram homogeneizados conforme a proporção estabelecida para constituir o substrato. O substrato foi esterilizado duas vezes em autoclave vertical, com ciclos de 2 horas a 120 °C, e um intervalo de 24 horas para resfriamento entre os ciclos. Após a esterilização, os tubetes de polietileno foram preenchidos com o substrato e acondicionados na casa de vegetação. As manivas foram plantadas verticalmente,

para facilitar o processo de emergência. A testemunha nitrogenada recebeu nitrogênio na forma de ureia, quinze dias após o plantio e a umidade foi mantida com irrigações diárias.

2.1. Avaliações morfológicas e fisiológicas

As mudas foram avaliadas aos 45 dias após o plantio, utilizando as seguintes variáveis: altura (ALT), diâmetro do caule (DC), número de folhas (NF), teores de clorofilas a, b e clorofila total (a + b), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca de raiz (MSR). A altura foi determinada medindo-se a distância entre o colo e o ápice da muda, utilizando uma régua graduada em centímetros. O diâmetro do caule foi medido com um paquímetro digital, considerando a base e o terço superior do caule, com os resultados expressos em milímetros. O número de folhas foi obtido pela contagem das folhas separadas de cada muda. A quantificação da clorofila foi realizada com o auxílio de um clorofilômetro eletrônico (ClorofiLOG CFL 1030, Falker).

Após essas avaliações, a parte aérea e as raízes das mudas foram lavadas, separadas e secas em estufa com circulação de ar forçado a uma temperatura de 65 °C até atingirem peso constante. A massa seca da parte aérea, das raízes e a massa seca total foram então determinadas por pesagem em balança analítica.

2.2. Análise estatística

Os resultados obtidos para todas as variáveis foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F ($p \leq 0,05$). As médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Todas as análises foram realizadas utilizando o software estatístico R (R Core Team, 2024).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As variáveis diâmetro de caule (DC), número de folhas (NF) e massa seca da parte aérea (MSPA) tiveram efeito isolado do fator genótipo (Tabela 1). O genótipo BR 11-34-64 obteve os maiores valores para essas variáveis, com destaque para o diâmetro de caule (DC) (4,23 mm planta) e massa seca da parte aérea (MSPA)

(0,79 g por planta), indicando maior vigor inicial (Tabela 1). Para o número de folhas (NF), tanto BR 11-34-64 quanto Poti Branca apresentaram as maiores médias (4,83 folhas planta⁻¹), não diferindo ($p > 0,05$) entre si. O genótipo Novo Horizonte apresentou os menores valores para todas as variáveis: 3,08 mm de diâmetro de caule, 3,58 folhas planta⁻¹ e 0,34 g por planta de MSPA, caracterizando menor desenvolvimento inicial. O genótipo BR 11-34-41 apresentou desempenho intermediário para diâmetro de caule (3,62 mm) e MSPA (0,50 g por planta), mas o menor número de folhas (3,83 folhas planta⁻¹).

O genótipo BR 11-34-64 destacou-se por apresentar maior diâmetro de caule e maior acúmulo de massa seca da parte aérea, indicando maior vigor e capacidade de crescimento nos primeiros estágios de desenvolvimento. Esses atributos são essenciais para o estabelecimento das plantas em campo, podendo refletir em maior produtividade futura (MAGALHÃES et al., 2016).

No que se refere ao número de folhas, BR 11-34-64 e Poti Branca apresentaram desempenho semelhante, mas apenas o primeiro converteu essa produção foliar em maior acúmulo de biomassa. Essa diferença pode estar relacionada à eficiência na utilização dos fotoassimilados e ao padrão de crescimento determinado pelo genótipo. De acordo com El-Sharkawy (2004), o número de folhas na mandioca é influenciado pelo genótipo, pela idade da planta e pelas condições ambientais, fatores que também modulam a taxa de emissão foliar e a capacidade de conversão de energia luminosa em biomassa.

Por outro lado, o genótipo Novo Horizonte apresentou desempenho inferior para DC, NF e MSPA, o que pode limitar seu uso em sistemas de produção que demandam maior uniformidade e vigor inicial. Além disso, a menor emissão foliar pode comprometer a fotossíntese e, conseqüentemente, reduzir o acúmulo de biomassa, afetando o desempenho produtivo da planta (ZHAO et al., 2005; MAHAKOSSE et al., 2022). Corroborando essa relação, um estudo identificou correlação positiva entre a formação de novas folhas e a produtividade de raízes de mandioca (TEMEGNE; NGOME, 2017)

Tabela 1. Médias de diâmetro de caule (DC), número de folhas (NF) e massa seca da parte aérea (MSPA) em mudas de mandioca, aos 45 dias após o plantio, em função dos genótipos.

Genótipo	DC mm planta ⁻¹	NF	MSPA g planta ⁻¹
Novo Horizonte	3,08 b	3,58 b	0,34 b
BR 11-34-64	4,23 a	4,83 a	0,79 a
BR 11-34-41	3,62 ab	3,83 b	0,50 b
Poti Branca	3,25 b	4,83 a	0,47 b
CV(%)	20,19	33,4	42,5

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

O número de folhas (NF) apresentou efeito isolado das fontes de nitrogênio, indicando que as diferentes fontes influenciaram o desenvolvimento foliar das mudas independentemente do genótipo (Tabela 2). O isolado bacteriano UFRB FA34C2-2 foi responsável pelo maior número médio de folhas (4,23 folhas planta⁻¹), diferindo significativamente dos demais tratamentos. A inoculação com o isolado UFRB FA7212-1 (3,08 folhas planta⁻¹) e a adubação mineral (3,25 folhas planta⁻¹) obtiveram médias inferiores. O maior número de folhas em plantas inoculadas com o isolado bacteriano UFRB FA34C2-2 indica maior eficiência desse isolado na promoção do crescimento vegetal, possivelmente relacionada à produção de fitormônios, como as auxinas, que estimulam a emissão foliar (BRAULIO, 2023).

Tabela 2. Número de folhas de mudas de mandioca, aos 45 dias após o plantio, em função das fontes de nitrogênio.

Fontes de Nitrogênio	Número de folhas
UFRB FA72A2-1	3,08 b
UFRB FA34C2-2	4,23 a
0 kg ha ⁻¹ N	3,62 ab
40 kg ha ⁻¹ N	3,25 b
CV(%)	33,4

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si (Teste Tukey, $p < 0,05$).

Foi observada interação significativa entre as fontes de nitrogênio e os genótipos de mandioca para as variáveis altura (ALT), clorofila a (CLA), clorofila b (CLB), clorofila total (CLT) e massa seca da raiz (MSR) ($p < 0,05$) (Tabela 3).

Tabela 3. Desdobramento da interação entre os genótipos e as fontes de nitrogênio para a altura das plantas (ALT), índice de clorofila a (CLA), índice de clorofila b (CLB), índice de clorofila total (CLT) e massa seca de raiz (MSR) em mudas de mandioca, aos 45 dias após o plantio.

Genótipo	Fonte de nitrogênio			
	UFRB FA72A2-1	UFRB FA34C2-2	0 kg ha ⁻¹ N	40 kg ha ⁻¹ N
ALT (cm planta ⁻¹)				
Novo Horizonte	12,5 bB	13,66 abAB	18,33 aA	15,6 aAb
BR 11-34-64	17,43 abA	17,06 aAB	11,63 bB	12,6 aAB
BR 11-34-41	14,83 abA	8,76 bB	10,86 bAB	14,66 aA
Poti Branca	18,2 aA	14,1 abA	15,93 abA	18,4 aA
CV=16,92%				
CLA				
Novo Horizonte	24,73 bAB	20,40 cB	26,60 aAB	28,27 aA
BR 11-34-64	32,43 aA	35,9 aA	32,37 aA	30,1 aA
BR 11-34-41	31,67 abAB	32,87 abA	25,00 aB	31,63 aAB
Poti Branca	32,4 aA	26,2 bcA	29,57 aA	31,1 aA
CV = 16,92 %				
CLB				
Novo Horizonte	5,93 bA	5 cA	6,9 aA	7,9 aA
BR 11-34-64	10,03 aA	12,17 aA	9,67 aA	8,93 aA
BR 11-34-41	8,73 abAB	10,23 abA	6,77 aB	9,83 aAB
Poti Branca	8,67abA	7,07 bcA	8,1 aA	9,53 aA
CV = 17,41 %				
CLT				
Novo Horizonte	30,67 bA	25,4 cA	33,5 aA	36,17 aA
BR 11-34-64	42,47 aA	48,07 aA	42,03 aA	39,03 aA
BR 11-34-41	40,40 abAB	43,10 abA	31,77 aB	41,47 aAB

Poti Branca	41,07 aA	33,27 bcA	37,67 aA	40,63 aA
CV=12,36%				
MSR (g planta ⁻¹)				
Novo Horizonte	0,3213 bB	0,2743 aB	1,145 aA	0,434 abB
BR 11-34-64	1,024 aA	0,496 aB	0,536 bAB	0,847 aAB
BR 11-34-41	0,504 bA	0,414 aA	0,531 bA	0,323 bA
Poti Branca	0,201 bB	0,352 aB	0,258 bB	0,89 aA
CV=43,77%				

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A interação entre os genótipos e as fontes de nitrogênio influenciou a altura das plantas ($p < 0,01$) e os dados obtidos confirmam a variabilidade genética na resposta às fontes de nitrogênio (Tabela 3).

Quanto a ALT, o genótipo Poti Branca alcançou média superior (18,2 cm planta⁻¹) aos demais quando inoculado com a estirpe UFRB FA72A2-1. Resultados semelhantes foram observados por Oliveira et al. (2024), que verificaram aumento no crescimento e altura de plantas de milho inoculadas com as estirpes UFRB FA72A2-1. BR 11-34-64 apresentou a maior ALT (17,06 cm planta⁻¹) quando inoculado com UFRB FA34C2-1. Ao analisar o tratamento controle (0 kg ha⁻¹ de N) observa-se que Novo Horizonte (18,33 cm planta⁻¹) foi o mais adaptado às condições de baixo N suplementar. Com a aplicação de 40 kg ha⁻¹ de nitrogênio as médias de altura não diferiram entre os materiais testados.

Comparando as fontes de nitrogênio para o genótipo Novo Horizonte, é possível notar que a maior altura foi alcançada quando cultivado sem adubação nitrogenada, o que sugere boa capacidade de crescimento inicial mesmo sob baixa disponibilidade do nutriente. Em contrapartida, a menor altura foi registrada sob inoculação com UFRB FA72A2-1, indicando que a estirpe não favoreceu o incremento da variável. Esse comportamento pode ser atribuído ao fato de que, até aproximadamente 30 dias após o plantio, o crescimento da parte aérea e das raízes da mandioca depende prioritariamente das reservas armazenadas na maniva-semente, antes que a planta estabeleça sua atividade fotossintética e a absorção eficiente de nutrientes no solo (EL-SHARKAWY, 2004). Assim, genótipos

com maior capacidade de mobilizar essas reservas podem apresentar crescimento inicial mais vigoroso, independentemente da adubação nitrogenada.

Para BR 11-34-64 a maior altura foi alcançada com a inoculação de FA72A2-1 (17,43 cm planta⁻¹), já na ausência de adubação nitrogenada mineral a altura foi diminuída em 33,27%. Comportamento similar é visto no cultivo de BR-34-41 que alcança (14,83 cm planta⁻¹) com a mesma estirpe e com a aplicação de 40 kg ha⁻¹ de nitrogênio (14,66 cm planta⁻¹), sem diferença estatística entre os valores, correspondente a aumentos de 36,5% e 35,0%, respectivamente, em relação ao controle sem adubação nitrogenada (10,86 cm planta⁻¹). Esse resultado é relevante para a agricultura sustentável, onde a redução da dependência de fertilizantes químicos traz benefícios ambientais significativos (DO et al., 2023; AASFAR et al., 2024; MAHAMUD et al., 2020; BRAULIO et al., 2021). A cultivar Poti Branca não apresentou diferenças estatísticas na altura ALT entre as diferentes fontes de nitrogênio.

Para variável CLA, os genótipos BR 11-34-64 (32,43) e Poti Branca (32,4) foram mais responsivas a UFRB FA72A2-1, enquanto Novo Horizonte apresentou o menor valor (24,73) com esse tratamento. Tratando da inoculação com FA34C2-2, BR 11-34-64 (35,9) se destacou entre as demais evidenciando sua elevada capacidade fotossintética sob inoculação bacteriana e/ou à indução de rotas bioquímicas associadas à biossíntese de pigmentos fotossintéticos (LUO et al., 2024; MARTINEZ-FERIA et al., 2024; YE et al., 2025). Os genótipos responderam de forma semelhante a presença (40 kg ha⁻¹ de N) e ausência (0 kg ha⁻¹) de adubação nitrogenada.

O genótipo Novo Horizonte obteve a maior média de CLA (28,27) com a adubação mineral de nitrogênio. BR 11-34-41 obteve valores elevados de CLA com a inoculação de FA34C2-2 (32,87). Em contrapartida, as médias de CLA de BR 11-34-64 e Poti Branca não variaram conforme as fontes de N. Esses resultados apontam a relevância de selecionar não apenas estirpes eficientes, mas também genótipos responsivos, de forma a maximizar os benefícios da inoculação (QUEIRÓS et al., 2024).

Em relação ao índice de clorofila b (CLB), ao utilizar a inoculação com as estirpes UFRB FA72A2-1 e UFRB FA34C2-2, o genótipo mais responsivo foi BR 11-34-64, alcançando médias 10,3 e 12,17, respectivamente. De forma semelhante aos resultados obtidos para CLA, os genótipos responderam de forma semelhante

a dose 40 kg ha⁻¹ de N e controle da adubação nitrogenada. Os valores de CLB para Novo Horizonte, BR 11-34-64 e Poti Branca não diferem entre as fontes de nitrogênio. Já para BR 11-34-41, a inoculação com FA34C2-2 (10,23), proporcionou o maior índice de clorofila B, reforçando a contribuição das bactérias promotoras de crescimento vegetal na elevação dos teores de clorofila.

Os genótipos Novo Horizonte, BR 11-34-64 e Poti Branca, não obtiveram valores distintos de CLT em função os fontes de nitrogênio utilizadas. No entanto, BR 11-34-41 obteve o maior valor médio quando inoculado com a estirpe UFRB FA34C2-2 (43,10) em comparação às demais fontes. Ao utilizar as estirpes bacterianas como fonte de nitrogênio, os genótipos BR 11-34-64 e Poti Branca alcançam maiores médias de CLT. No entanto o genótipo Novo Horizonte apresentou menor eficiência nessa interação, obtendo médias inferiores com o uso dos inoculantes, o que sugere que a resposta ao inoculante varia entre espécies ou genótipos e que não há compatibilidade dessas estirpes com o genótipo.

Oliveira et al. (2024) relataram aumento no teor de clorofila total em milho inoculado com essas mesmas estirpes. De forma semelhante, para BR 11-34-64 e Poti Branca e BR 11-34-41, as bactérias promotoras de crescimento também contribuíram para o incremento do índice de clorofila, o que pode indicar um efeito indireto dessas bactérias na síntese desse pigmento, uma vez que seu conteúdo está diretamente correlacionado ao acúmulo de nitrogênio nas plantas (LIU et al., 2012).

Quanto à massa seca da raiz (MSR), em resposta à inoculação com FA72A2-1 o genótipo BR 11-34-64 apresentou o melhor desempenho (1,024 g planta⁻¹), proporcionando um incremento de 91,04% em relação ao tratamento controle (0,536 g planta⁻¹). Em contrapartida, a inoculação FA34C2-2 não promoveu médias diferenciadas de MSR entre os genótipos. As raízes da mandioca são uma importante fonte de carboidratos alimentares e industriais e têm alto valor econômico como matéria-prima para a produção industrial de amido e ração animal (BLAGBROUGH et al., 2010). O desenvolvimento do sistema radicular da mandioca tem início por volta do sétimo dia após o plantio, e entre o segundo e o terceiro mês ocorre a diferenciação das raízes que atuarão como estruturas de reserva de amido (EL-SHARKAWY, 2004). Dessa forma, o estímulo ao crescimento radicular na fase inicial é essencial para favorecer o aumento da produção de raízes (SILVA et al., 2012).

O aumento da biomassa radicular observado pode estar associado à atuação de estirpes bacterianas com múltiplas funções benéficas. A estirpe UFRB FA72A2-1 (*Bacillus cereus*) além da fixação biológica de nitrogênio (FBN), apresenta potencial para produção de auxinas, proteases, amilases, bem como para a solubilização de fósforo (P) e potássio (K) (SOUSA, 2017; BRAULIO, 2023). Esses mecanismos promovem maior desenvolvimento do sistema radicular, favorecendo a absorção de água e nutrientes. Em especial, bactérias do gênero *Bacillus* são associadas ao incremento da biomassa de raízes, superando inclusive plantas adubadas com nitrogênio mineral, além de estimularem o crescimento da parte aérea, como altura, diâmetro do caule e massa seca (AQUINO et al., 2019; BRAULIO, 2023).

Tendo em vista a ampla diversidade genética da mandioca, ainda se faz necessário aprofundar os estudos para compreender as respostas específicas dos diferentes genótipos à inoculação com bactérias promotoras de crescimento. Esse conhecimento é fundamental para otimizar o uso dessas bactérias como alternativa sustentável à adubação nitrogenada.

4. CONCLUSÕES

O genótipo BR 11-34-64 apresentou as maiores médias de diâmetro do colmo, número de folhas, massa seca da parte aérea e também dos índices de clorofila, especialmente quando inoculado com as estirpes *Bacillus cereus* UFRB FA72A2-1 e *Achromobacter spanius* UFRB FA34C2-2.

O genótipo Novo Horizonte demonstrou crescimento inicial inferior e baixa responsividade às inoculações, sugerindo menor compatibilidade com as bactérias testadas.

A inoculação especialmente com a estirpe UFRB FA72A2-1, com potencial para contribuir em sistemas sustentáveis de produção de mandioca, desde que se considerem as especificidades de resposta de cada genótipo.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASFAR, A.; KADMIRI, I. M.; AZAROUAL, S. E.; LEMRISS, S.; MERNISSI, N. E.; BARGAZ, A.; ZEROUAL, Y.; HILALI, A. Agronomic advantage of bacterial biological nitrogen fixation on wheat plant growth under contrasting nitrogen and phosphorus regimes. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1388775, 2024.

AGUILERA, J. G.; KREWER, B. I.; LIMA, R. E.; ZUFFO, A. M.; RATKE, R. F.; JUNIOR, J. A. A.; MARTÍNEZ, L. A. Posição da maniva e aplicação de *Azospirillum brasilense* influenciam caracteres agrônômicos da mandioca. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 4, p. e53711427750, 2022.

AQUINO, J. P. A.; MACEDO JUNIOR, F. B.; ANTUNES, J. E. L.; FIGUEREDO, M. V. B.; NETO, F. A.; ARAUJO, A. S. F. Plant growth-promoting endophytic bacteria on maize and sorghum. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 49, p. e56241, 2019.

BLAGBROUGH, I.; BAYOUMI, S.; ROWAN, M.; BEECHING, J. Mandioca: uma avaliação de sua fitoquímica e suas perspectivas biotecnológicas. **Fitoquímica**, v. 71, n. 17-18, p. 1940-1951, 2010.

BORGES, A. L.; SILVA, J. D.; SOUZA, L. D. S.; GOMES, J. D. C.; LUCIANO, D. S. S.; JAYME, D. C. G. Calagem e adubação para a mandioca. In: BORGES, A. L. (org.). **Recomendações de calagem e adubação para abacaxi, acerola, banana, citros, mamão, mandioca, manga e maracujá**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2021.

BRAULIO, C. S. **Microrganismos na promoção de crescimento de feijão-caupi e maracujazeiro e no controle de fusariose**. 2023. 147 f. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias: Agricultura Tropical) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2023.

BRAULIO, C. S. **Microrganismos na promoção de crescimento de feijão-caupi e maracujazeiro e no controle de fusariose**. 2023. 147 f. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias: Agricultura Tropical) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2023.

BRAULIO, C. S.; SILVA, L. F. L.; SILVA, C. S.; CORREIA, A. J. ROCABADO, J.M.A.; NÓBREGA, R. S. A. Can inoculation with diazotrophic bacteria decrease the productivity loss of defoliated *Vigna unguiculata* (L.) Walp? **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.25, n.3, p.189-196, 2021.

CEN, X.; LI, H.; ZHANG, Y.; HUANG, L.; LUO, Y. Isolation and plant growth promotion effect of endophytic siderophore-producing bacteria: a study on halophyte *Sesuvium portulacastrum*. **Plants**, v. 13, p. 2703, 2024.

CHENG, Y.; SHI, X.; NARAYANAN, M.; LI, Z.; LI, Y.; MA, Y. Enhancing nutrient uptake efficiency in *Zea mays*: the role of plant growth-promoting bacteria in modifying root characteristics and mobilizing soil nutrients. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 105, n. 9, p. 5030-5039, 2025.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Histórico mensal mandioca**. Disponível em: https://www.conab.gov.br/infoagro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/historicomensal-demandioca/item/download/51987_3201329c95fb5ceac2d88b6ee8ac6edc. Acesso em: 20 jun. 2025.

DO, T. Q.; NGUYEN, T. T.; DINH, V. M. Application of endophytic bacterium *Bacillus velezensis* BTR11 to control bacterial leaf blight disease and promote rice growth. **Egyptian Journal of Biological Pest Control**, v. 33, p. 97, 2023.

EL-MEIHY, R. M.; HASSAN, S. E. D.; EL-SHAHED, A. M.; FAYED, H. M. Efficiency of heavy metals-tolerant plant growth promoting bacteria for alleviating heavy metals toxicity on sorghum. **Environmental and Experimental Botany**, v. 162, p. 295–301, 2019.

EL-SHARKAWY, M. A. Cassava biology and physiology. **Plant molecular biology**, Amsterdam, v. 56, p. 481-501, 2004.

FERNANDES, A. M.; SILVA, J. A.; EBURNEO, J. A. M.; LEONEL, M.; GARRETO, F. G. S.; NUNES, J. G. S. Growth and nitrogen uptake by potato and cassava crops can be improved by *Azospirillum brasilense* inoculation and nitrogen fertilization. **Horticulturae**, v. 9, n. 3, p. 301, 2023.

GUPTA, S.; PANDEY, S. ACC deaminase producing bacteria with multifarious plant growth promoting traits alleviates salinity stress in French bean (*Phaseolus vulgaris*) plants. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, p. 1506, 2019.

HOWELER, R. H. Diagnosis of nutritional problems of cassava. In: HOWELER, R. H. **The cassava handbook: a reference manual based on the Asian regional cassava training course, held in Thailand**. Bangkok, TH: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), p. 305–320, 2012.

IMMANUEL, S.; JAGANATHAN, D.; PRAKASH, P.; SIVAKUMAR, P. S. Cassava for food security, poverty reduction and climate resilience: A review. **Indian Journal of Ecology**, v. 51, n. 1, p. 21-31, 2024.

JALA, I. M.; DA SILVA, C. C.; SAMPAIO FILHO, J. S.; OLIVEIRA, E. J.; NÓBREGA, R. S. A. Mudanças de variedades de mandioca são responsáveis pela adubação orgânica. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 40, n. 5 Supl. 1, p. 2151-2164, 2019.

LIU, Z. A.; YANG, J. P.; YANG, Z. C. Using a chlorophyll meter to estimate tea leaf chlorophyll and nitrogen contents. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 12, n. 2, p. 339-348, 2012.

LUO, D.; SHI, J.; LI, M.; CHEN, J.; WANG, T.; ZHANG, Q.; YANG, L.; ZHU, N.; WANG, Y. Consortium of phosphorus-solubilizing bacteria promotes maize growth and changes the microbial community composition of rhizosphere soil. **Agronomy**, v. 14, n. 7, p. 1535, 2024.

MAGALHÃES, J. E. S.; FERREIRA, E. A.; OLIVEIRA, M. C.; PEREIRA, G. A. M.; SILVA, D. V.; SANTOS, J. B. Effect of plant-bioestimulant on cassava Initial growth. **Revista Ceres**, v. 63, n.2, p. 208-213, 2016.

MAHAKOSEE, S.; JOGLOY, S.; VORASOOT, N.; THEERAKULPISUT, P.; TOOMSAN, B.; HOLBROOK, C. C.; KVIEN, C.; BANTERNG, P. Light Interception and Radiation Use Efficiency of Three Cassava Genotypes with Different Plant Types and Seasonal Variations. **Agronomy**, v. 12, n. 11, p. 2888, 2022.

MAHMUD, K.; CHEN, D.; DAI, Z.; XU, J.; FAN, J. Current progress in nitrogen fixing plants and microbiome research. **Plants**, v. 9, n. 1, p. 97, 2020.

MARTINEZ-FERIA, R.; SIMMONDS, M. B.; OZAYDIN, B.; LEWIS, S.; SCHWARTZ, A.; PLUCHINO, A.; MCKELLAR, M.; GOTTLIEB, S. S.; KAYASTSKY, T.; VITAL, R.; MEHLMAN, S. E.; CARON, Z.; COLAIANNI, N. R.; ANÉ, J. M.; MAEDA, J.; INFANTE, V.; KARLSSON, B. H.; MCLIMANS, C.; VYN, T.; HANSON, B.; VERHAGEN, G.; NEVINS, C.; REESE, L.; OTYAMA, P.; TEMME, K. Genetic remodeling of soil diazotrophs enables partial replacement of synthetic nitrogen fertilizer with biological nitrogen fixation in maize. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 27754, 2024.

MEKUREYAW, M. F.; PANDEY, C.; HENNESSY, R. C.; NICOLAISEN, M. H.; LIU, F.; NYBROE, O.; ROITSCH, T. The cytokinin-producing plant beneficial bacterium *Pseudomonas fluorescens* G20-18 primes tomato (*Solanum lycopersicum*) for enhanced drought stress responses. **Journal of Plant Physiology**, v. 270, p. 153629, 2022.

OLIVEIRA, E. P.; SANTOS, J. D. O.; MELO, C. S.; OLIVEIRA, A. L. M.; CARVALHO, T. L. G. Humic substances and plant growth-promoting bacteria enhance corn (*Zea mays* L.) development. **South African Journal of Botany**, v. 166, p. 539–549, 2024.

OTEKUNRIN, O. A. Mandioca (*Manihot esculenta* Crantz): uma pegada científica global — produção, comércio e insights bibliométricos. **Discovery Agriculture**, v. 2, art. 94, 2024.

QUEIRÓS, L. S. S.; VALICHESKI, R. R.; DE OLIVEIRA, S. S. C.; CRUZ, S. J. S.; STÜRMER, S. L. K.; DE OLIVEIRA, S. G. M. Aspectos biométricos e nutricional de cultivares de mandioca com inoculantes biológicos. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 17, n. 2, p. e11762, 2024.

SANTOS, C. L. R.; BORGES, W. L. B.; OLIVEIRA, E. P.; OLIVEIRA, R. P.; MELO, I. S. Contribution of a mixed inoculant containing strains of *Burkholderia* spp. and *Herbaspirillum* spp. to the growth of three sorghum genotypes under increased nitrogen fertilization levels. **Applied Soil Ecology**, v. 113, p. 96–106, 2017.

SILVA, D. V.; SANTOS, J. B.; FERREIRA, E. A.; FRANÇA, A. C.; SILVA, A. A.; SEDIYAMA, T. Manejo de plantas daninhas na cultura da mandioca. **Planta Daninha**, v. 30, p. 901-910, 2012.

SOUSA, J. X. **Promoção do Crescimento Vegetal por Bactérias Diazotróficas no Feijão-Caupi**. Dissertação (Mestrado em Solos e Qualidade de Ecossistemas) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, Bahia, 2017.

TEMEGNE, C. N.; NGOME, F. A. Manejo da fertilidade para a produção de mandioca na região central de Camarões. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 16, n. 5, p. 1-8, 2017.

UMAPATHI, M.; SUGANTHI, V.; ARULSELVI, P. *Bacillus* sp. and *Pseudacidovorax intermedius* colonization effect on biochemical and metabolites expression in drought-stressed *Sorghum bicolor* (L.) Moench. **Plant Stress**, v. 11, p. 100424, 2024.

YE, M.; LANG, J.; KONG, X.; SHI, Z.; DUAN, F.; QIN, G.; ZHANG, H.; GUO, D.; ZHOU, N. Nitrogen-fixing bacteria promote the growth of *Fritillaria taipaiensis* PY Li by regulating physiological and biochemical reactions and protecting enzyme system-related gene expression. **Biology**, v. 14, n. 4, p. 325, 2025.

ZHAO, D.; REDDY, R.; KAKANI, V. G.; REDDY, V. R. Nitrogen deficiency effects on plant growth, leaf photosynthesis, and hyperspectral reflectance properties of sorghum. **European Journal of Agronomy**, v. 22, n. 4, p. 391-403, 2005.