



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DO SOLO

JOSEPH JORDAN POVEDA CARRILLO

**COMUNIDADE MICROBIANA SINTÉTICA (SYNCOM) PROMOVE REDUÇÃO DA
ADUBAÇÃO NITROGENADA NA BANANEIRA**

FORTALEZA

2026

JOSEPH JORDAN POVEDA CARRILLO

COMUNIDADE MICROBIANA SINTÉTICA (SYNCOM) PROMOVE REDUÇÃO DA
ADUBAÇÃO NITROGENADA NA BANANEIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do solo da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestrado em Ciências do solo. Área de concentração: Química, fertilidade e biologia do solo

Orientador: Prof. Dr. Wardsson Lustrino Borges.

FORTALEZA

2026

JOSEPH JORDAN POVEDA CARRILLO

COMUNIDADE MICROBIANA SINTÉTICA (SYNCOM) PROMOVE REDUÇÃO DA
ADUBAÇÃO NITROGENADA NA BANANEIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do solo da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestrado em Ciências do solo. Área de concentração: Química, fertilidade e biologia do solo.

Orientador: Prof. Dr. Wardsson Lustrino Borges.

Aprovada em: 28/01/2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wardsson Lustrino Borges (Orientador)

Embrapa Agroindústria Tropical– CNPAT

Prof. Dr. Arthur Prudêncio de Araujo Pereira

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr.^a Vanessa de Abreu Pereira

Embrapa Agroindústria Tropical– CNPAT

A Deus.

Aos meus pais, Inés Carrillo e Jorge Poveda.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por abençoar minha vida, cuidar de mim e proteger-me ao longo da minha trajetória, sendo a luz que orienta meus passos e fortalece minhas decisões.

Aos meus pais, Inés e Jorge, pelo amor incondicional, pela confiança depositada em mim e, sobretudo, pelo apoio constante que tornou possível a conclusão desta importante etapa da minha vida.

Aos meus tios, Myriam, Anita, Alex, Marco e Christian, por serem exemplos de união, afeto e generosidade, e por me ensinarem, por meio de suas atitudes, o valor de compartilhar, amar e celebrar a vida.

Ao grupo de pesquisa do Laboratório de Microbiologia do Solo, pelo apoio contínuo, pela acolhida e pelas trocas de experiências que tornaram a rotina mais leve e contribuíram significativamente para o meu crescimento pessoal e profissional. Em especial, agradeço a Vanessa, Alice, Lilian, Naara, Nathan e Oprah, cuja colaboração foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho e que transformaram os desafios diários em momentos mais produtivos e agradáveis.

Ao meu orientador, Dr. Wardsson Lustrino, pela confiança em meu potencial, pelos ensinamentos, orientações e pelo apoio dedicado em todas as etapas deste projeto. Agradeço também pelas oportunidades e experiências proporcionadas, que foram fundamentais para minha formação acadêmica e profissional.

À Universidade Federal do Ceará (UFC) e à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), pelo suporte institucional, estrutural e financeiro indispensável à realização deste projeto de pesquisa.

O presente trabalho foi desenvolvido com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), por meio do Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Tecnológico e Científico (CNPq) processo número 420711/2023-6.

RESUMO

O cultivo da banana é essencial para a segurança alimentar, porém sua elevada dependência de fertilizantes nitrogenados gera altos custos e impactos ambientais. Nesse contexto, o uso de Comunidades Microbianas Sintéticas (Synthetic Microbial Communities – SynCom) surge como uma alternativa biotecnológica para aumentar a eficiência nutricional. Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência agrônômica de um SynCom composto por estirpes do gênero *Bacillus* e bactérias diazotróficas na promoção do crescimento de mudas de bananeira cv. Prata Catarina, com redução do uso de fertilizantes nitrogenados. As estirpes foram caracterizadas in vitro quanto à fixação biológica de nitrogênio (FBN), produção de ácido indol-3-acético (AIA), solubilização e mineralização de fósforo, além da produção de biossurfactantes e sideróforos. *Bacillus subtilis* BR10788 e *Azospirillum lipoferum* BR11501 destacaram-se pela elevada produção de AIA (46,06 e 43,51 $\mu\text{g mL}^{-1}$, respectivamente) e atividade positiva de FBN. A solubilização e mineralização de fósforo apresentaram baixos índices, porém com potencial funcional complementar. *Azospirillum lipoferum* BR11501 e *Acidovorax* sp. BR11652 apresentaram maior produção de biossurfactantes e sideróforos, evidenciada por índices de emulsificação de até 68% e halos de até 2,07 mm, evidenciando seu papel na mobilização de nutrientes e na colonização radicular. Em casa de vegetação, a co-inoculação das estirpes selecionadas (*Bacillus* LPPC282 \times *Azospirillum lipoferum* BR11501 e *Bacillus subtilis* BR10788 \times *Acidovorax* sp. BR11652) apresentaram um efeito sinérgico superior à inoculação individual, promovendo incrementos de até 127,90% na massa seca da parte aérea e 100% na massa seca das raízes, mesmo sob níveis reduzidos de nitrogênio. Conclui-se que o SynCom desenvolvido apresenta elevado potencial biotecnológico, uma vez que a complementaridade funcional entre produção de auxinas, fixação biológica de nitrogênio, síntese de biossurfactantes e sideróforos contribuiu para a melhoria do crescimento e do acúmulo de biomassa das mudas de bananeira.

Palavras-chave: adubação; rizobactérias; co-inoculação; fixação biológica de nitrogênio; promotores de crescimento em plantas.

ABSTRACT

Banana cultivation is essential for food security; however, its high dependence on nitrogen fertilizers results in increased production costs and environmental impacts. In this context, the use of Synthetic Microbial Communities (SynCom) emerges as a biotechnological alternative to enhance nutrient use efficiency. This study aimed to evaluate the agronomic efficiency of a SynCom composed of *Bacillus* strains and diazotrophic bacteria in promoting the growth of banana seedlings cv. Prata Catarina, with reduced nitrogen fertilizer input. The strains were functionally characterized in vitro for biological nitrogen fixation (BNF), indole-3-acetic acid (IAA) production, phosphorus solubilization and mineralization, as well as the production of biosurfactants and siderophores. *Bacillus subtilis* BR10788 and *Azospirillum lipoferum* BR11501 stood out for their high IAA production (46.06 and 43.51 $\mu\text{g mL}^{-1}$, respectively) and positive BNF activity. Phosphorus solubilization and mineralization showed low levels for all strains but indicated complementary functional potential. *Azospirillum lipoferum* BR11501 and *Acidovorax* sp. BR11652 exhibited higher biosurfactant and siderophore production, evidenced by emulsification indices of up to 68% and siderophore halos reaching 2.07 mm, highlighting their role in nutrient mobilization and root colonization. Under greenhouse conditions, co-inoculation of the selected strains (*Bacillus* LPPC282 \times *Azospirillum lipoferum* BR11501 and *Bacillus subtilis* BR10788 \times *Acidovorax* sp. BR11652) showed a synergistic effect superior to individual inoculation, promoting increases of up to 127.90% in shoot dry mass and 100% in root dry mass, even under reduced nitrogen levels. It is concluded that the developed SynCom exhibits high biotechnological potential, as the functional complementarity among auxin production, biological nitrogen fixation, and biosynthesis of biosurfactants and siderophores contributed to enhanced growth and biomass accumulation of banana seedlings.

Keywords: fertilization; rhizobacteria; co-inoculation; biological nitrogen fixation; growth promoters in plants.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Teste qualitativo para fixação de nitrogênio de vida livre em meios JMV, JNFB, NFB e LGI isentos de nitrogênio, inoculados com as estirpes bacterianas do gênero <i>Bacillus</i> sp. e fixadores de nitrogênio.....	28
Figura 2 – Análise para produção do ácido indolacético (AIA) complementado com o reagente de Salkowski.	30
Figura 3 – Testes de solubilização e mineralização de fósforo em meio de cultura Pikovskaya PVK enriquecido com fosfato de cálcio para solubilização e com lecitina de soja para mineralização.	31
Figura 4 – Reação do reagente colorimétrico de ácido ascórbico com o fosfato solúvel produzido pelas estirpes bacterianas em meio de cultura PVK.....	33
Figura 5 – Atividade biossurfactante avaliada no teste colapso da gota realizado nas estirpes bacterianas.	34
Figura 6 – Atividade biossurfactante avaliada no teste dispersão em óleo realizado pelas estirpes bacterianas.	34
Figura 7 – Teste de emulsificação e estabilidade da coluna de emulsão obtidos das estirpes bacterianas utilizadas.	36
Figura 8 – Teste para produção de sideróforos realizado para as estirpes bacterianas avaliadas.	37
Figura 9 – Massa seca de parte aérea e de raízes de mudas do tipo raiz nua de bananeira cultivar Prata Catarina inoculadas com bactérias promotoras do crescimento vegetal.....	38
Figura 10 – Massa seca de parte aérea e de raízes de mudas do tipo pré-aclimatadas de bananeira cultivar Prata Catarina inoculadas com bactérias promotoras do crescimento vegetal.	39
Figura 11 – Massa seca de parte aérea e de raízes de mudas do tipo raiz nua de bananeira cultivar Prata Catarina co-inoculadas com bactérias promotoras do crescimento vegetal.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Microrganismos promotores de crescimento e agentes de controle biológico da Embrapa.....	22
Tabela 2 – Formação de película aerotóxica pelas estirpes bacterianas do gênero <i>Bacillus</i> sp. e fixadores de nitrogênio inoculadas nos meios semissólidos JMV, JNFB, NFB e LGI sem nitrogênio.....	29
Tabela 3 – Concentração de AIA produzido pelas estirpes de bacterianas analisadas do gênero <i>Bacillus</i> sp. e fixadores de nitrogênio.....	30
Tabela 4 – Índices de solubilização (IS) obtidos pelas estirpes bacterianas aos 15 dias de crescimento	32
Tabela 5 – Índices de mineralização (MI) obtidos pelas estirpes bacterianas aos 15 dias de crescimento.	32
Tabela 6 – Resultado da avaliação da atividade de biosurfactante das estirpes bacterianas...	35
Tabela 7 – Índice de emulsificação e estabilidade de emulsão pelas estirpes bacterianas avaliadas.	35
Tabela 8 – Índice da síntese de produção de sideróforos obtidos pelas estirpes bacterianas inoculadas em meio de cultura ágar King B suplementado com o corante cromoazurol S (CAS).....	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	HIPÓTESE	14
3	OBJETIVOS.....	14
3.1	Objetivo geral.....	14
3.2	Objetivos específicos.....	14
4	REVISÃO DE LITERATURA	15
4.1	Aspectos agronômicos, exigências nutricionais e o uso de biofertilizantes na cultura da bananeira	15
4.2	Promotores de crescimento em plantas (PGPB)	17
4.2.1	<i>Comunidade microbiana sintética (SynCom)</i>	19
4.3	Aplicação de PGPB e SynCom na cultura da bananeira	20
5	MATERIAL E MÉTODOS	22
5.1	Estirpes promotoras de crescimento	22
5.2	Caracterização das propriedades de promoção do crescimento vegetal <i>in vitro</i>	23
5.2.1	<i>Fixação biológica de Nitrogênio</i>	23
5.2.2	<i>Avaliação da produção de auxinas AIA (ácido indol-3-acético)</i>	23
5.2.3	<i>Solubilização e mineralização de fosfato</i>	23
5.2.4	<i>Produção de biossurfactante</i>	24
5.2.5	<i>Avaliação da síntese de sideróforos</i>	25
5.3	Avaliação da eficiência agronômica das estirpes	26
5.4	Análise estatística.....	27
6	RESULTADOS	28
6.1	Caracterização funcional para promoção do crescimento vegetal <i>in vitro</i>	28
6.1.1	<i>Fixação de nitrogênio</i>	28
6.1.2	<i>Produção de auxinas AIA (ácido indol-3-acético)</i>	29
6.1.3	<i>Solubilização e mineralização de fosfato</i>	31
6.1.4	<i>Produção de biossurfactantes</i>	33

6.1.5	<i>Síntese e produção de sideróforos</i>	36
6.2	Eficiência agronômica das estirpes	37
7	DISCUSSÃO	42
8	CONCLUSÃO	47
	REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

A banana é um fruto do tipo baga, alongado e carnoso, originado de uma planta herbácea com expressiva relevância econômica (GOMES et al., 2024). Rica em vitaminas, minerais e açúcares a banana contribui para a saúde e está presente na alimentação de diferentes faixas etárias e classes sociais (HARISH et al., 2008). Devido ao seu valor nutricional, palatabilidade e acessibilidade, figura entre as frutas mais produzidas e consumidas no mundo (KUMAR et al., 2015; MEDEIROS, 2020) e tem um papel relevante na geração de renda para pequenos agricultores e para o fornecimento de matéria prima para a agroindústria (SANTOS et al., 2017). O Brasil está no grupo dos seis maiores produtores globais de banana juntamente com a Índia, China, Indonésia, Nigéria e Equador (FAOSTAT, 2024). No ano de 2023, o cultivo da banana ocupou 456.5 mil hectares no Brasil, resultando em uma colheita de 6.83 milhões de toneladas e uma produtividade média de 14.951 kg ha⁻¹ (IBGE, 2024; MELO et al., 2015). Nesse ano os produtores brasileiros exportaram 56,2 mil toneladas de banana para diferentes países, reafirmando o papel desta fruta no comércio exterior brasileiro (FRANCISCO et al. 2024).

A produção intensiva de banana exige a aplicação de elevadas quantidades de fontes de nutrientes, especialmente de nitrogênio, fósforo, potássio cálcio e magnésio (ARAÚJO et al., 2024). Adicionalmente, diversas pragas como o nematoide *Radopholus similis*, o gorgulho *Cosmopolites sordidus*, os fungos *Mycosphaerella* e *Fusarium* comprometem a produtividade e elevam os custos de produção, exigindo alternativas sustentáveis (MON et al., 2021). Diversas estratégias têm sido adotadas para mitigar pragas e otimizar a nutrição na cultura da bananeira, como rotação de culturas, adubação verde, pousio com alagamento, fumigação química, uso de mudas micropropagadas, aplicação de insumos orgânicos, bioinsumos e seleção de genótipos superiores (CASTRICINI et al., 2015; SANTOS et al., 2013). Entre as cultivares adotadas, a Prata Catarina destaca-se por sua resistência a ventos e baixas temperaturas, tolerância moderada à murcha de *Fusarium* e maior produtividade (GARANTIZADO et al., 2020). Essa variedade adapta-se bem a condições ambientais adversas, o que favorece sua adoção em diversas regiões produtoras (PEREIRA et al. 2019).

No contexto de ocorrência de pragas e elevada demanda por água e por nutrientes o cultivo da bananeira é desafiador e em muitos casos os métodos de controle de pragas adotadas têm se mostrado pouco eficazes (POSADA et al., 2016). Diante disso, o uso de microrganismos como agentes de biocontrole e promotores de crescimento vegetal surge como alternativa promissora para a cultura (PIROMYOU et al., 2011). Os biofertilizantes à base de

rizobactérias ajudam na manutenção da fertilidade do solo e aumentam a absorção de água e nutrientes minerais pela planta (RODRIGUES et al., 2021). O desenvolvimento das bananeiras está fortemente relacionado à biodiversidade microbiana no solo, especialmente na rizosfera (BAIS et al., 2006). As raízes bem desenvolvidas liberam exsudatos que estimulam microrganismos benéficos (PEREIRA et al., 2018). Estes microrganismos desempenham papéis como fixação biológica de nitrogênio (FBN), solubilização e mineralização de nutrientes, produção de sideróforos, produção de fitohormônios, controle biológico de patógenos e atenuação dos efeitos negativos de estresses bióticos e abióticos (PEREIRA et al., 2019; PIROMYOU et al., 2011).

As comunidades microbianas sintéticas (SynCom) são definidas como consórcios de microrganismos co-cultivados sob condições controladas, projetados para reproduzir a estrutura funcional do microbioma natural de maneira amplificada e rastreável (VORHOLT et al., 2017; SHAYANTHAN et al., 2022). A construção dessas comunidades baseia-se na seleção racional de estirpes compatíveis, visando estabelecer interações ecológicas robustas que favoreçam a colonização do hospedeiro vegetal (KAMINSKY et al., 2019; SOUZA et al., 2020). O diferencial dessa estratégia reside na complementaridade metabólica, onde vias bioquímicas distintas atuam sinergicamente para amplificar serviços ecossistêmicos, como a nutrição mineral e a modulação hormonal (TIMOFEEVA et al., 2023; SOUZA et al., 2024). Dessa forma, a aplicação de SynComs promove maior estabilidade funcional e resiliência agrônômica em comparação ao uso de inoculantes mono-estirpe, consolidando-se como uma ferramenta eficaz para a agricultura sustentável (MEENAKSHI et al., 2019).

Diversos estudos têm evidenciado a importância da interação entre a bananeira e bactérias endofíticas, que contribuem para o crescimento e adaptação da planta. ROCHA et al. (2019) destacaram que a estirpe EB-40 (*Bacillus* sp.) apresenta ampla capacidade de colonização, atuando em diferentes tecidos da planta e na rizosfera, além de interagir diretamente com a membrana plasmática e a parede celular, o que sugere mecanismos específicos de disponibilização de nutrientes e tolerância a estresses ambientais. De forma complementar, BASET et al. (2010) verificaram que plântulas de bananeira cv. 'Berangan' estabeleceram associações benéficas com as estirpes Sp7 (*Azospirillum brasilense* Sp7) e UPMB10 (*Bacillus sphaericus* UPMB10), resultando em maior desenvolvimento radicular, formação de pelos absorventes e incremento na parte aérea, na área foliar e no teor de clorofila. Esses achados reforçam o potencial do uso de bactérias promotoras de crescimento como biofertilizantes no cultivo da bananeira.

Diante da necessidade de reduzir o uso de fertilizantes minerais e combater os desafios fitossanitários, torna-se urgente a adoção de tecnologias mais sustentáveis (LIMA, 2016). Assim, o uso de bioinsumos surge como alternativa para diminuir a dependência de adubos químicos e mitigar impactos ambientais (POSADA et al., 2016). Nesse contexto, comunidades microbianas sintéticas, compostas por microrganismos multifuncionais, têm se destacado por sua eficácia na promoção do crescimento vegetal, controle biológico e na melhoria da eficiência de absorção de nutrientes. O presente estudo visa construir e avaliar uma SynCom funcional baseada em espécies de *Bacillus* e bactérias fixadoras de nitrogênio, com o objetivo de consolidar práticas produtivas mais sustentáveis e eficientes para a bananicultura brasileira.

2 HIPÓTESE

H₀: A inoculação de estirpes bacterianas portadoras de habilidades para promoção do crescimento vegetal selecionadas promove o crescimento de bananeira em condição de baixo suprimento de nitrogênio.

H₁: A inoculação de consórcios bacterianos promove o crescimento de bananeira e promove eficiência do uso do nitrogênio.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Avaliação da eficiência agronômica de comunidades microbianas sintéticas (SynCom) como bioinsumo capaz de potencializar o uso dos adubos nitrogenados na cultura da bananeira.

3.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar estirpes de *Bacillus* sp. e de fixadores de nitrogênio, quanto às propriedades relacionadas à promoção do crescimento de plantas.
2. Avaliar a eficiência agronômica de estirpes de *Bacillus* sp. e de bactérias fixadores de nitrogênio na bananeira cultivar Prata Catarina em condição de casa de vegetação.
3. Avaliar a eficiência agronômica de consórcios bacterianos (*Bacillus* sp. e fixadores de nitrogênio) na bananeira cultivar Prata Catarina em condição de casa de vegetação.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Aspectos agronômicos, exigências nutricionais e o uso de biofertilizantes na cultura da bananeira

A bananeira (*Musa* spp. L.) tem origem predominante no sudeste da Ásia, enquanto regiões da África são reconhecidas como centros secundários de diversidade dessa espécie. A bananeira pertence à família Musaceae, subfamília Musoideae, sendo uma planta monocotiledônea do gênero *Musa* (LOPES, 2018). Trata-se de uma planta herbácea que possui um caule subterrâneo denominado rizoma, responsável por armazenar nutrientes e dar suporte aos demais órgãos. A parte aérea aparente, chamada pseudocaule, é composta pela justaposição das bainhas das folhas, sustentando uma copa com folhas grandes, alongadas e dotadas de uma nervura central pronunciada (ALMEIDA, 2017). Sua inflorescência é composta por brácteas ovais, e em suas axilas nascem as flores. Em cada grupo de flores reunidas forma uma penca (mão) com um número variável de frutos (dedos), originados por partenocarpia (SOCORRO, 2011).

Os cultivares de banana são classificados em diferentes grupos genômicos, incluindo Maçã (AAB), Prata (AAB) e Cavendish (AAA), cada um com características agronômicas e comerciais específicas (RODRIGUES, 2011). No grupo Maçã, destacam-se os cultivares BRS Princesa e BRS Tropical, conhecidos por sua polpa doce e aroma intenso, sendo suscetíveis à doença do mal-do-Panamá. Já o grupo Prata inclui cultivares como Prata-Anã, BRS Platina e Pacovan, caracterizados por maior resistência ao transporte e boa adaptação a diferentes condições edafoclimáticas. O grupo Cavendish, amplamente cultivado para exportação, engloba cultivares como Nanica, Nanicão, Grande Naine e Williams, que apresentam alto rendimento produtivo e resistência ao transporte, mas são vulneráveis à fusariose tropical raça 4 (ARANTES et al., 2017).

Para sustentar esse potencial produtivo e as características específicas de cada cultivar, o manejo nutricional torna-se um fator decisivo, uma vez que, por apresentar um crescimento acelerado, a bananeira demanda elevadas quantidades de nutrientes para alcançar seu desenvolvimento. Embora parte desses nutrientes essenciais possa ser fornecida pelo próprio solo e pelos resíduos das colheitas (ORTEGA et al., 2019), na maioria dos casos, torna-se indispensável a aplicação de calcário, adubos químicos e/ou orgânicos para garantir a viabilidade econômica da produção (HOFFMANN et al., 2010).

Neste contexto de alta exigência nutricional, destacam-se os macronutrientes. O nitrogênio (N) desempenha papéis importantes no metabolismo vegetal, tais como, participação na constituição dos aminoácidos, das proteínas e das enzimas, bases nitrogenadas e ácidos

nucléicos, vitaminas, pigmentos, fotossíntese, respiração e multiplicação celular (MAIA et al., 2019). Nas áreas produtoras de banana no Brasil, as quantidades de nitrogênio aplicadas em cultivos comerciais costumam variar entre 90 e 300 kg de N ha⁻¹ (MELO et al., 2002). A carência desse nutriente provoca desordens fisiológicas que se manifestam visualmente, especialmente nas folhas, que são órgãos com intensa atividade metabólica. Paralelamente, o fósforo (P) encontra-se em baixa concentração nos solos tropicais que apresentam alta capacidade de fixação. Esse nutriente possui funções importantes compondo fosfolipídios, coenzimas e nucleotídeos, atuando em processos fisiológicos essenciais, como a transferência de energia, fotossíntese, síntese de proteínas e na fixação biológica do nitrogênio (FBN) (BORGES e SILVA, 2004). Durante o ciclo da bananeira, o fósforo é o sexto nutriente mais absorvido, variando de 0 a 150 kg de P₂O₅ ha⁻¹ ano⁻¹ (SILVA et al., 2011). A deficiência de fósforo compromete o desenvolvimento do sistema radicular, refletindo negativamente na produção e na qualidade dos frutos, já que sua carência reduz os teores de açúcar. Nas folhas, essa deficiência se manifesta por clorose marginal, popularmente conhecida como “dente de serra” (TEIXEIRA et al., 2001). Da mesma forma, o potássio (K) está presente no solo sob quatro formas distintas: estrutural, não trocável, trocável e na solução do solo, sendo esta última a forma disponível para absorção pelas plantas (LACERDA et al., 2015). No metabolismo vegetal, o potássio é absorvido na forma iônica K⁺ e não se integra a compostos orgânicos. Suas principais funções incluem a ativação de enzimas, a regulação da abertura e fechamento dos estômatos (controlando o balanço hídrico) e o transporte de carboidratos através do floema (PINTO et al., 2005). Na cultura da banana, a formação dos frutos está intimamente ligada ao fornecimento adequado de potássio, sendo este considerado o nutriente mais crucial para a planta, devido às elevadas quantidades exigidas e absorvidas ao longo do ciclo. As doses recomendadas de potássio podem variar entre 100 e 750 kg de K₂O ha⁻¹ dependendo dos níveis desse nutriente no solo (BORGES e SILVA, 2004; MELO et al., 2002).

Visando complementar a adubação convencional e promover práticas mais sustentáveis, o uso de insumos alternativos tem ganhado relevância. De acordo com NUNES et al. (2023), os biofertilizantes são fertilizantes líquidos obtidos pela combinação de materiais orgânicos e/ou inorgânicos com água, sendo essa mistura submetida a processos de decomposição aeróbica e/ou anaeróbica. Após esse processo, podem ser aplicados na adubação de plantio, cobertura ou via foliar. Esses produtos contêm substâncias ativas ou microrganismos benéficos que contribuem para a melhoria do desempenho agrícola e não possuem componentes proibidos pela legislação referente à produção orgânica (MACEDO et al., 2023).

Os biofertilizantes oferecem diversos benefícios tanto para o solo quanto para as plantas cultivadas, como o estímulo à atividade microbiana do solo; o fornecimento balanceado de nutrientes essenciais às plantas superiores; o fortalecimento da resistência a estresses ambientais, pragas e doenças; além de promoverem um melhor desenvolvimento das plantas em todas as fases de crescimento e contribuir para o aumento da produtividade, tanto em quantidade quanto em qualidade. Ademais, trata-se de um insumo orgânico, livre de origem fóssil, que não provoca impactos negativos ao meio ambiente (MACEDO et al., 2021).

4.2 Promotores de crescimento em plantas (PGPB)

A aplicação de PGPB ganhou atenção considerável, principalmente devido às propriedades complementares exibidas por diversas estirpes bacterianas (TIMOFEEVA et al., 2023). Os consórcios bacterianos provaram ser mais eficientes do que uma abordagem de inoculação de uma única espécie (MEENAKSHI et al., 2019). Por exemplo, descobriu-se que um consórcio de *Bacillus subtilis*, *Bacillus thuringiensis* e *Bacillus megaterium* melhora significativamente as atividades metabólicas, como aumento do teor de clorofila, riboflavina, L-asparagina e acúmulo de aspartato, ao mesmo tempo em que mitiga a atividade de resposta ao estresse em *Cicer arietinum* sob condições de seca (KHAN et al., 2019).

Os mecanismos diretos de promoção de crescimento são fundamentais para reduzir a dependência de fertilizantes sintéticos na agricultura moderna (BACKER et al., 2018). A Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) destaca-se como o processo em que bactérias diazotróficas convertem o nitrogênio atmosférico em amônia, utilizando o complexo enzimático da nitrogenase para nutrir a planta (OLEŃSKA et al., 2020). Adicionalmente, a síntese de fitohormônios, como o ácido indol-3-acético (AIA), modula a arquitetura radicular aumentando a superfície de absorção de água e nutrientes do solo (GLICK, 2012). A integração desses mecanismos permite que a planta mantenha seu vigor fisiológico e acúmulo de biomassa mesmo em solos com baixa disponibilidade de nitrogênio mineral (PETRILLO et al., 2022).

Além do aporte de nitrogênio, a solubilização de fosfatos é uma característica vital para o estabelecimento das culturas. Nos experimentos de BORHAM et al. (2017) isolaram *Enterobacter* sp. da rizosfera de plantas de arroz e explicam sua capacidade de solubilização de fosfato, além disso, observaram que a inoculação em trigo aumentou a altura e massa das plantas, área foliar, índice de clorofila, número e peso de grãos. Da mesma forma, ROSLAN et al. (2020) investigaram o potencial de solubilização de P e *Enterobacter* spp. melhorou significativamente os parâmetros gerais de germinação e o índice de vigor (19,6%) das plântulas de quiabo (*Abelmoschus esculentus*), também mostrou melhora significativa do crescimento

das plantas (28%), o que correspondeu ao aumento da absorção de P e K (89%) em relação às plantas controle não inoculadas.

A eficiência da FBN pode ser potencializada pela interação com outros elementos ou condições do solo. ZHANG et al. (2023) utilizaram bactérias diazotróficas redutoras de ferro *Anaeromyxobacter* e *Geobacter* para verificar a capacidade de fixação de nitrogênio, sugerindo que com a aplicação de ferro no solo de arroz aumentou a quantidade de nitrogênio fixado no solo a comparação de um solo nativo de arroz sem ferro. Da mesma forma, KUSS et al. (2007) isolaram bactérias diazotróficas das raízes de arroz e determinaram que *Azospirillum brasilense* e *A. lipoferum* produzem *in vitro* os maiores valores para N total com 41,08 e 46,82 $\mu\text{g mL}^{-1}$, respectivamente. Porém, RODRIGUES et al. (2021) evidenciaram que a aplicação de inoculante via foliar em soja com bactérias fixadoras de nitrogênio *Bradyrhizobium japonicum* aumentou as concentrações de clorofila nas folhas nas parcelas do estágio V3, o que gerou, conseqüentemente, mais vagens e maior produtividade.

Na bioprospecção de rizobactérias promotoras de crescimento em *Bachiaria Brizantha* de ARAUJO et al. (2012) caracterizaram sete isolados de *Bacillus* sp. com a capacidade de produzir o ácido indol-3-acético (AIA) entre 7,04 e 18,9 $\mu\text{g mL}^{-1}$. Igualmente, no trabalho de Araujo e Guerreiro (2010) foram selecionados isolados do gênero *Bacillus* que foram inoculados em milho apresentando a estirpe RUB-2 uma produção de AIA de 15,4 $\mu\text{g mL}^{-1}$. No entanto, VOLPIANO et al. (2013) mencionam que ao usar *Herbaspirillum seropedicae* e *Azospirillum brasilense* como co-cultivo *in vitro* com plântulas de trigo ambas as bactérias foram capazes de aumentar a síntese de AIA estimulando o desenvolvimento e protegendo contra o estresse hídrico.

Estudos de SARWAR et al. (2020) revelaram que os isolados identificados como *Bacillus subtilis*, *Bacillus halotolerans* e *Bacillus safensis* produziram unidades máximas de sideróforos maior ao 60% apresentando um aumento na liberação de ferro de 82, 71 e 69% em relação ao controle, respectivamente. Do mesmo modo, VALDEZ-NUÑEZ et al. (2020) encontraram estirpes de *Bacillus megaterium* e *Burkholderia vietnamiensis* que podem atuar como agentes de biocontrole contra *Burkholderia glumae* porque estas bactérias produziram a maior concentração de sideróforos solúveis em 55,84 e 97,36 %.

4.2.1 Comunidade microbiana sintética (SynCom)

As comunidades microbianas sintéticas (SynCom) consistem em pequenos consórcios de microrganismos co-cultivados sob condições bem definidas, projetados para reproduzir, em alguma escala, a estrutura e a função do microbioma observado em ambientes naturais (VORHOLT et al., 2017; SHAYANTHAN et al., 2022). O conceito central das SynComs baseia-se na amplificação da comunidade microbiana natural, mantendo interações-chave entre microrganismos e hospedeiros para potencializar funções ecossistêmicas (KAMINSKY et al., 2019). Essas comunidades apresentam vantagens por reunirem diferentes vias metabólicas que atuam de forma sinérgica, permitindo que as estirpes compensem as limitações umas das outras no ambiente rizosférico (SOUZA et al., 2020). Assim, a construção de um SynCom funcional visa superar a inconsistência de resultados frequentemente observada na inoculação de estirpes isoladas a campo (TIMOFEEVA et al., 2023).

A aplicação de SynComs voltada para a nutrição vegetal fundamenta-se na complementaridade de nichos ecológicos e metabólicos. A combinação de bactérias diazotróficas com microrganismos solubilizadores de fosfato cria um ambiente nutricional enriquecido, favorecendo o desenvolvimento vegetal mesmo em solos pobres (OLEŃSKA et al., 2020). Além disso, a presença de múltiplos gêneros bacterianos aumenta a produção de exsudatos radiculares, o que recruta mais microrganismos benéficos e estimula a atividade enzimática do solo (PETRILLO et al., 2022). Essa diversidade funcional assegura que, caso uma estirpe falhe devido a estresses ambientais, outras possam manter a promoção de crescimento, garantindo a estabilidade agrônômica (WALLENSTEIN, 2017). O uso dessas comunidades desenhadas representa, portanto, uma estratégia robusta para maximizar a eficiência dos insumos biológicos na agricultura moderna (MARIN et al., 2021).

No contexto específico da redução da adubação nitrogenada, as SynComs demonstram potencial superior ao aumentar a Eficiência do Uso de Nitrogênio (NUE). Estudos indicam que a co-inoculação de *Bacillus* sp. e *Azospirillum* sp. resulta em maior absorção de nitrato e amônia pelas raízes, otimizando o metabolismo do nitrogênio interno da planta (GALINDO et al., 2025). A interação sinérgica entre essas bactérias promove alterações na expressão de genes transportadores de nitrato, facilitando sua assimilação e conversão em biomassa vegetal (OLEŃSKA et al., 2020). Consequentemente, as plantas inoculadas com consórcios apresentam maior teor de clorofila e taxas fotossintéticas elevadas, mesmo sob regimes de fertilização reduzida (BACKER et al., 2018). Essa abordagem biotecnológica válida a substituição parcial de fertilizantes químicos por inoculantes complexos sem penalizar a produtividade da cultura (SOUZA et al., 2024).

4.3 Aplicação de PGPB e SynCom na cultura da bananeira

A pesquisa de SOUZA et al. (2016) demonstrou que mudas micropropagadas de bananeira cv. Prata Anã responderam positivamente à inoculação tripla de bactérias promotoras de crescimento. A combinação de *B. subtilis* (EB-40), *B. pumilus* (EB-51), *Lysinibacillus* sp. (EB-53), *Paenibacillus* sp. (EB-144) e *Bacillus* sp. (EB-194) promoveu maior crescimento do pseudocaule e incremento significativo da massa seca radicular (até 174%). Além disso, observaram-se ganhos na absorção de macro e micronutrientes, evidenciando o potencial dessas estirpes como biofertilizantes e como promotoras da saúde e qualidade do solo no cultivo da bananeira.

Assim mesmo, SOUZA et al. (2013) e Andrade et al. (2014) revelaram que isolados bacterianos endófitos das raízes de bananeira cv. Prata Anã, como EB-40 (*Bacillus* sp.), EB-47 (*Bacillus* sp.), EB-53 (*Lysinibacillus* sp.), EB-64 (*Bacillus* sp.), EB-126 (*Bacillus subtilis*) e EB-144 (*Paenibacillus* sp.), apresentam capacidades de fixação de nitrogênio, solubilização de fósforo e produção de ácido indol-3-acético (IAA). Essas funções ocorreram de forma individual ou combinada, contribuindo para o crescimento e vigor das plântulas. Os resultados destacam o potencial de *Bacillus* sp. e *Lysinibacillus* sp. como inoculantes microbianos promotores do crescimento no cultivo da bananeira.

Da mesma forma SOUZA et al. (2017) nos seus estudos indicam que a inoculação de mudas micropropagadas de bananeira cv. Prata Anã com bactérias endofíticas promotoras de crescimento como *Bacillus* sp. (EB-40 e EB-50), *Bacillus subtilis* (EB-55), *Bacillus pumilus* (EB-51) e *Bacillus amyloliquefaciens* (EB-133) destacam-se pelos efeitos positivos no aumento do comprimento e diâmetro do pseudocaule, bem como no acúmulo de biomassa. Tais benefícios estão associados à capacidade dessas bactérias de realizar fixação biológica de nitrogênio, solubilização de fosfato inorgânico e síntese de ácido indol-3-acético (AIA), evidenciando seu potencial como biofertilizantes e agentes de promoção de crescimento em bananicultura.

WEBER et al. (2001) caracterizaram bactérias diazotróficas associadas à bananeira quanto aos seus aspectos morfológicos e fisiológicos. Dois grupos apresentaram semelhança com o gênero *Herbaspirillum* sp. e atividade de nitrogenase em meio JNFb sem nitrogênio, com valores mais elevados em pH de 6,5 a 7,0. De forma semelhante, bactérias diazotróficas foram isoladas de diferentes genótipos de bananeira, a partir de raízes, colmos, folhas e frutos, sendo distribuídas em sete grupos morfológica e fisiologicamente distintos, relacionados principalmente aos gêneros *Azospirillum* sp. (*A. amazonense*, *A. lipoferum*, *A. brasilense*), *Burkholderia* sp. e *Herbaspirillum* sp. (*H. seropedicae*). Esses isolados testaram positivo pela

formação de película próxima à superfície do meio NFb, reforçando o potencial das bactérias fixadoras de N₂ na redução do uso de fertilizantes químicos nitrogenados e na promoção de sistemas agrícolas mais sustentáveis (WEBER et al., 1999). Conforme relatado por Weber et al. (2000), as bactérias diazotróficas influenciam o crescimento de mudas micropropagadas de bananeira. No seu trabalho, mudas de cv. Prata Anã cultivadas em substrato pobre em nitrogênio se desenvolveram melhor na presença de bactérias do gênero *Herbaspirillum* sp., enquanto mudas de cv. Caipira tiveram maior crescimento com inoculação de bactérias do gênero *Burkholderia*.

Apesar dos benefícios comprovados da inoculação individual, a complexidade da rizosfera da bananeira sugere que o uso de múltiplas estirpes pode oferecer resultados mais consistentes a campo (SOUZA et al., 2016). A combinação de bactérias diazotróficas com promotores de crescimento do gênero *Bacillus* sp. tem demonstrado potencial para superar as limitações de inoculantes simples, especialmente no enraizamento e nutrição de mudas (WEBER et al., 2000). Experimentos com co-inoculação revelam que a interação positiva entre microrganismos endofíticos e rizosféricos potencializa a absorção de nutrientes e o desenvolvimento vegetativo da cultivar Prata Anã (ANDRADE et al., 2014). Portanto, a formulação de um SynCom específico para bananeira representa um avanço tecnológico necessário para reduzir a dependência de insumos químicos sem comprometer a produtividade (BASET et al., 2010).

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Estirpes promotoras de crescimento

As estirpes pertencentes ao gênero *Bacillus* e as estirpes fixadoras de nitrogênio que foram utilizadas neste projeto estão depositadas em coleções de microrganismos promotores de crescimento e agentes de controle biológico da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) (Tabela 1). Foram utilizados seis isolados da *Bacillus*, originalmente obtidos em trabalhos desenvolvidos no Laboratório de Patologia Pós-Colheita (LPPC) e que atualmente compõem a coleção de trabalho do Laboratório de Solos (Microbiologia do Solo), ambos do Centro Nacional de Pesquisa de Agroindústria Tropical (CNPAT). Um isolado de *Bacillus* e os cinco isolados de fixadores de nitrogênio estão depositados no Centro de Recursos Biológicos - Johanna Döbereiner (CRB-JD) do Centro Nacional de Pesquisa de Agrobiologia (CNPAB). Os isolados foram selecionados em experimentos prévios, conduzidos entre os anos de 2022 e 2024 no CNPAT, no âmbito do desenvolvimento dos projetos Uso integrado de insumos biológicos, orgânicos e organominerais visando incremento da fertilidade do solo e da produtividade da bananeira, financiado pela Fundação Agricultura Sustentável (Agrisus, PA 3466/22) e pela Embrapa (SEG: 20.22.00.172.00.00) e Microrganismos multifuncionais: Uma alternativa biológica para a produção sustentável de bananeiras, financiado pela Embrapa (SEG: 20.20.03.041.00.00).

Tabela 1 – Microrganismos promotores de crescimento e agentes de controle biológico da Embrapa.

Estirpe	Identificação Taxonômica	Origem in situ (Município e estado ou País)	Cultura onde foi isolada
BR 11501	<i>Azospirillum lipoferum</i>	Itaguaí, RJ	Musa sp.
BR 11652	<i>Acidovorax</i> sp.	Itaguaí, RJ	Musa sp.
BR 11674	<i>Herbaspirillum</i> sp.	Cruz das Almas, BA	Musa sp.
BR 11676	<i>Acidovorax</i> sp.	Itaguaí, RJ	Musa sp.
BR 12157	<i>Rhizobium</i> sp.	Uruburetama, CE	Musa sp.
LPPC136	<i>Bacillus</i> sp.	Limoeiro do Norte, CE	Musa sp.
LPPC138	<i>Bacillus</i> sp.	Barra de Santo Antônio, AL	Musa sp.
LPPC250	<i>Bacillus</i> sp.	Aratuba, CE	Musa sp.
LPPC259	<i>Bacillus subtilis</i>	Umirim, CE	Musa sp.
LPPC265	<i>Bacillus safensis</i>	Redenção, CE	Musa sp.
LPPC282	<i>Bacillus</i> sp.	Quixeré, CE	Musa sp.
BR 10788	<i>Bacillus subtilis</i>	Oriximiná, PA	<i>Pseudopiptadenia psilostachya</i>

Fonte: Dados da pesquisa.

5.2 Caracterização das propriedades de promoção do crescimento vegetal in vitro

5.2.1 Fixação biológica de Nitrogênio

A capacidade de fixação de nitrogênio foi analisada em quatro meios semissólido livres de nitrogênio (JMV, JNFb, NFB e LGI). Os testes foram realizados em triplicata, em tubos de 10 mL contendo 6 mL de meio. Os meios foram inoculados com 10 µL de suspensão bacteriana. Os tubos foram incubados a 28°C, observados diariamente e, no quinto foi avaliado a formação de película característica abaixo da superfície do meio (OLIVEIRA et al., 2024).

5.2.2 Avaliação da produção de auxinas AIA (ácido indol-3-acético)

A avaliação da produção de AIA pelos isolados foi realizada com base na metodologia proposta por KUSS et al. (2007). Para isso, as estirpes foram cultivadas em 5 mL de meio líquido DYGS e KADO para os fixadores de nitrogênio e os *Bacillus* sp., mantidos à temperatura ambiente com agitação orbital (150 rpm) por 24 h para o desenvolvimento dos *Bacillus* sp. e 72 h para os fixadores N₂. Após esse período, as amostras foram centrifugadas a 5.000 g por 10 minutos. O sobrenadante foi descartado e se adicionou 5 mL de água destilada estéril ao precipitado celular. A densidade óptica (DO) das suspensões foi ajustada adicionando-se alíquotas de solução salina até alcançar DO₆₀₀ de 0,6 (PEREIRA et al., 2021).

Após o ajuste da densidade óptica (DO) foram inoculados 0,5 mL da suspensão contendo os isolados em 5 mL de meio líquido DYGS ou KADO com 100 µL de L-triptofano, e foram agitados a 30°C por mais 72 e 24 horas, respectivamente. Em seguida, 5,5 mL de suspensão foram centrifugados por 10 minutos a 5.000 g. Após a centrifugação o sobrenadante foi misturado com o reagente de Salkowski na proporção 3:1. Os tubos contendo a suspensão foram mantidos no escuro por 20 min para o desenvolvimento da cor. Quanto mais intensa a tonalidade rosa-avermelhada, maior a quantidade de ácido indol-3-acético presente. A intensidade da cor foi medida em espectrofotômetro a 535 nm. A curva padrão foi construída para a quantificação da produção de AIA, utilizando soluções de AIA em diferentes concentrações, variando de 0 a 50 µg mL⁻¹, com coeficiente de determinação (R²) de 0,99013 (RAMOS et al., 2021).

5.2.3 Solubilização e mineralização de fosfato

O meio de cultura Pikovskaya PVK, enriquecido com fosfato de cálcio Ca₃(PO₄)₂ (fonte de fósforo inorgânica) ou lecitina de soja (fonte de fósforo orgânica), foi utilizado na avaliação qualitativa da capacidade de solubilização e mineralização de fosfato, respectivamente (NAUTIYAL, 1999). Para a inoculação, 20 µL da suspensão bacteriana foram

aplicados em três pontos equidistantes de cada placa de Petri contendo o meio de cultura, em triplicata. As placas foram incubadas em uma estufa tipo BOD a 28 °C por 15 dias, com avaliação da formação e diâmetro do halo aos 3, 7 e 15 dias (MATOS et al., 2017).

As zonas de solubilização foram analisadas por meio da medição dos diâmetros das colônias bacterianas, utilizando um paquímetro digital. Os dados obtidos foram usados para calcular o índice de solubilização (IS), que corresponde à razão entre o diâmetro da zona de solubilização e o diâmetro da colônia (BERRAQUERO et al., 1976). A eficiência de solubilização foi avaliada com base na escala proposta por SILVA FILHO e VIDOR (2000), os valores menores de 1,0 são classificados como muito baixo, valores entre 1,0 e 2,0 como baixos, valores entre 2,0 e 3,0 como médios, e valores superiores a 3,0 como solubilizantes altos.

Adicionalmente, a solubilização e a mineralização de fósforo foram analisadas por colorimetria. Para isso, os isolados bacterianos foram cultivados em meio líquido PVK, suplementado com fontes de fosfato inorgânico e orgânico. As culturas serão incubadas a 28°C, sob agitação constante de 150 rpm, por um período de 1 - 2 dias. Após esse intervalo, os cultivos serão centrifugados a 5.000 g por 10 minutos, e os sobrenadantes obtidos foram filtrados, com o objetivo de remover exsudatos complexos, como os polissacarídeos. A concentração de fósforo solúvel foi determinada por meio do método colorimétrico utilizando ácido ascórbico (LIU et al., 2021). Todas as determinações foram realizadas em triplicata para cada uma das estirpes avaliadas.

5.2.4 *Produção de biosurfactante*

5.2.4.1 *Colapso da gota*

Para o colapso da gota, volumes de 10 µL de óleo lubrificante queimado foram adicionados individualmente em cada poço de uma tampa de placa de 96 poços e mantidos em repouso à temperatura ambiente por 24 h. Após esse intervalo, 10 µL da cultura foram cuidadosamente adicionadas sobre a superfície do óleo e foi observado o formato de gota na superfície do óleo. O teste apresentou dois controles, um controle positivo com solução dodecil sulfato de sódio (SDS) a 1% e um controle negativo com água deionizada. A reação foi considerada positiva quando ocorreu espalhamento ou dispersão total ou parcial da gota e negativo quando não houve alteração visível. A atividade biosurfactante será classificada em três níveis, de acordo com a intensidade do espalhamento: fraca (+), moderada (++) e forte (+++) (OLIVEIRA, 2020).

5.2.4.2 *Dispersão em óleo*

Para o teste de dispersão do óleo, placas de Petri foram preparadas com 35 mL de água destilada, sobre a qual foram adicionados 100 µL de óleo lubrificante queimado na superfície da água. Em seguida, 10 µL da cultura celular foram colocadas no centro da interface óleo-água e o controle positivo foi realizado com solução de dodecil sulfato de sódio (SDS) a 1% e para o controle negativo água destilada. O resultado foi considerado positivo quando ocorreu o espalhamento ou dispersão total ou parcial da gota e negativo quando não houve alteração visível. A atividade do biosurfactante foi classificada em três níveis, de acordo com a intensidade do espalhamento: fraca (+), moderada (++) e forte (+++) (OLIVEIRA et al., 2024).

5.2.4.3 *Emulsificação*

A capacidade de emulsificação foi determinada pela adição de 2,0 mL de querosene comercial em tubos de ensaio com tampa de rosca contendo 2,0 mL de cultura celular, seguida de uma mistura por agitação vigorosa em vórtice a 3000 rpm por 2 min. O índice de emulsificação foi calculado pela razão entre a altura da coluna de emulsão após 24 h e a altura total da coluna. A estabilidade da emulsão foi avaliada de forma semelhante, considerando a altura da emulsão da coluna após 48h e 72h, respectivamente (OLIVEIRA et al., 2021).

5.2.5 *Avaliação da síntese de sideróforos*

O ensaio foi conduzido conforme descrito por ALEXANDER e ZUBERER (1991), as estirpes bacterianas foram cultivadas em placas de Petri contendo meio de cultura ágar King B suplementado com o corante cromoazurol S (CAS) preparado segundo SCHWYN e NEILANDS (1987). Para cada estirpe, foram realizadas três repetições. As placas foram incubadas no escuro, a 28 °C, por 24 h no caso de bactérias de crescimento rápido e por até cinco dias para aquelas de crescimento lento. A produção de sideróforos foi indicada pela formação de um halo de coloração laranja ou rosa ao redor da colônia, e, posteriormente, foi determinado o Índice de Produção de Sideróforos (IPS) que corresponde à razão entre o diâmetro do halo e o diâmetro da colônia (PATEL et al., 2018).

5.3 Avaliação da eficiência agrônômica das estirpes

Foram realizados três experimentos em condição de casa de vegetação para avaliação da capacidade de promoção do crescimento da bananeira cultivada em condição de baixo suprimento de nitrogênio pelas estirpes selecionadas. O primeiro experimento foi realizado com a inoculação das 12 estirpes isoladamente em mudas de bananeira cultivar Prata Catarina de tipo raiz nua e o segundo experimento com a inoculação das 12 estirpes isoladamente em mudas de bananeira pré-aclimatadas e o terceiro experimento com a coinoculação das quatro estirpes mais promissoras, identificadas no primeiro e segundo experimento em mudas de bananeira de raiz tipo nua, com base na análise de massa seca de parte aérea e de raízes.

Os experimentos foram realizados em condição de casa de vegetação na sede da Embrapa Agroindústria Tropical, em Fortaleza, Ceará, Brasil. O primeiro ensaio foi conduzido em bandejas plásticas com células com capacidade para 126 cm⁻³, preenchidas com substrato composto por fibra de coco. As mudas foram cultivadas por 60 dias, sendo 15 dias em túnel de sombrite, 30 dias em sistema floating com aplicação de solução nutritiva Hoagland e, finalmente 15 dias em bancada. Foram avaliados 12 tratamentos de inoculação e dois controles sem inoculação, sendo um com aplicação de solução Hoagland completa (N-mineral) e um com aplicação de solução Hoagland sem nitrogênio (Controle). Os tratamentos com inoculação foram adubados com solução Hoagland sem nitrogênio. Foram realizadas quatro adubações com intervalo de 7 dias no sistema floating, utilizando 33 mL de solução por muda. Foram realizadas quatro inoculações aos 7, 14, 21 e 28 dias após o transplante. O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados (DBC) com seis repetições, sendo cada repetição composta por 5 mudas.

O segundo experimento foi conduzido conforme descrito no primeiro experimento, utilizando mudas do tipo pré-aclimatada e 66 mL de solução nutritiva por muda. O terceiro experimento foi realizado da mesma forma como está descrito anteriormente avaliando a eficiência agrônômica da comunidade microbiana sintética (SynCom) composta pelas quatro estirpes mais promissoras selecionadas nas etapas anteriores: BR10788 (*Bacillus subtilis*), LPPC282 (*Bacillus* sp.), BR11501 (*Azospirillum lipoferum*) e BR11652 (*Acidovorax* sp.). A seleção destes isolados baseou-se na complementaridade de suas características multifuncionais, visto que o grupo apresenta potencial para a Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) e destaca-se pela capacidade de síntese de Ácido Indol-3-Acético (AIA), além da produção de sideróforos e biossurfactantes, mecanismos essenciais para a promoção de crescimento vegetal. Os tratamentos foram avaliados em dois níveis de adubação nitrogenada

e um controle sem inoculação. O primeiro nível de adubação consistiu em duas aplicações de solução Hoagland completa (N-mineral) e duas aplicações de solução Hoagland sem N-mineral (Nível 1). O segundo nível de adubação consistiu em quatro aplicações de solução Hoagland completa (N-mineral) (Nível 2). Em cada adubação foram utilizados 33 mL de solução por muda. O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados (DBC), em arranjo fatorial 5 x 2, com seis repetições, sendo cada repetição composta por 5 mudas. Ao final do período, a eficiência agrônômica foi determinada com base na análise de massa seca da parte aérea (MSPA) e da massa seca de raízes (MSR).

5.4 Análise estatística

Os dados foram analisados por meio de análise de variância (ANOVA) e do teste de Scott-Knott, adotando um nível de significância de 5%, com o auxílio do software Sisvar (FERREIRA, 2011). A elaboração dos gráficos foi realizada no GraphPad Prism, versão 10.4.1 para Windows, desenvolvido pela GraphPad Software, San Diego, Califórnia, EUA. O registro do acesso ao patrimônio genético foi efetuado no Sistema Nacional de Gestão do Patrimônio Genético e do Conhecimento Tradicional Associado, vinculado ao Ministério do Meio Ambiente (SISGEN, MMA), sob os números A352B4E e AA1FE2B, em conformidade com a Lei 13.123/2015 (BRASIL, 2015) e suas normativas.

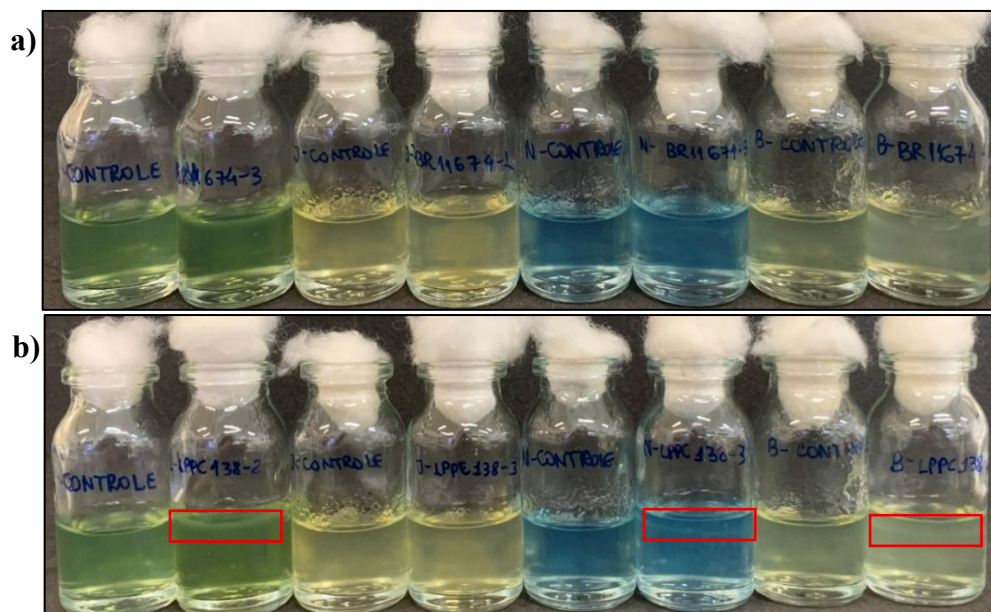
6 RESULTADOS

6.1 Caracterização funcional para promoção do crescimento vegetal *in vitro*

6.1.1 Fixação de nitrogênio

As estirpes pertencentes ao gênero *Bacillus* e as estirpes fixadoras de nitrogênio foram analisadas quanto as suas propriedades como bactérias promotoras de crescimento. Primeiramente, foi realizado a capacidade de fixação biológica de nitrogênio de vida livre (Figura 1a), na qual as estirpes LPPC282 (*Bacillus* sp.), BR11674 (*Herbaspirillum* sp.) e BR11676 (*Acidovorax* sp.) não apresentaram a formação da película aerotóxica esbranquiçada (Figura 1 – a), característica principal das bactérias fixadoras de nitrogênio de vida livre ao ser inoculadas nos meios JMV, JNFB, NFB e LGI (Figura 1 – b).

Figura 1 – Teste qualitativo para fixação de nitrogênio de vida livre em meios JMV, JNFB, NFB e LGI isentos de nitrogênio, inoculados com as estirpes bacterianas do gênero *Bacillus* sp. e fixadores de nitrogênio.



Fonte: Dados da pesquisa. a) Teste negativo para a formação da película aerotóxica sub condições de baixo oxigênio. b) Teste positivo para a formação da película aerotóxica.

No entanto, nove estirpes formaram película em meio semi-sólido (Tabela 2), dando como resultado positivo em todos os meios de cultura unicamente para a estirpe BR11501 (*Azospirillum lipoferum*), as estirpes LPPC136 (*Bacillus* sp.), LPPC265 (*Bacillus safensis*), BR11652 (*Acidovorax* sp.) só em três meios JNFB, LGI e NFB, as estirpes LPPC138 (*Bacillus* sp.), LPPC250 (*Bacillus* sp.), BR10788 (*Bacillus subtilis*) em dois meios LGI e NFB, e as estirpes LPPC259 (*Bacillus subtilis*), BR12157 (*Rhizobium* sp.) apenas no meio LGI.

Tabela 2 – Formação de película aerotáxica pelas estirpes bacterianas do gênero *Bacillus* sp. e fixadores de nitrogênio inoculadas nos meios semissólidos JMV, JNFb, NFB e LGI sem nitrogênio.

Gênero	Estirpe	JMV	JNFb	LGI	NFB
<i>Bacillus</i> sp.	BR 10788	-	-	+	+
	LPPC 136	-	+	+	+
	LPPC 138	-	-	+	+
	LPPC 250	-	-	+	+
	LPPC 259	-	-	+	-
	LPPC 265	-	+	+	+
	LPPC 282	-	-	-	-
<i>Acidovorax</i> sp.	BR 11652	-	+	+	+
	BR 11676	-	-	-	-
<i>Rhizobium</i> sp.	BR 12157	-	-	+	-
<i>Herbaspirillum</i> sp.	BR 11674	-	-	-	-
<i>Azospirillum</i> sp.	BR 11501	+	+	+	+

Fonte: Dados da pesquisa. (+) Positivo para formação de película no meio de cultura. (-) Negativo para formação de película no meio de cultura.

6.1.2 Produção de auxinas AIA (ácido indol-3-acético)

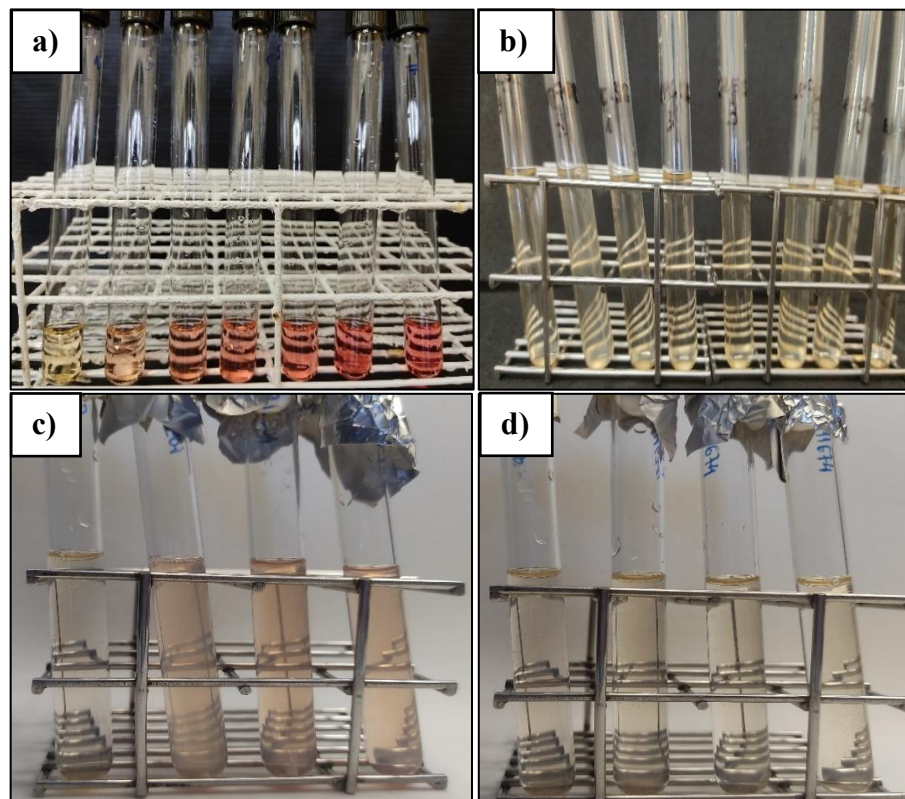
Toda as estirpes apresentaram produção de auxinas AIA (Figura 2) com uma média que varia entre 6,69 e 46,06 $\mu\text{g mL}^{-1}$ (Tabela 3). Os intervalos para os *Bacillus* foi de 9,97 até 46,06 $\mu\text{g mL}^{-1}$, sendo a estirpe BR10788 (*Bacillus subtilis*) a maior produtora com 46,06 $\mu\text{g mL}^{-1}$ seguida de LPPC282 (*Bacillus* sp.) com 43,18 $\mu\text{g mL}^{-1}$. As bactérias fixadoras de nitrogênio apresentaram valores inferiores em relação à produção desse fitohormônio, com um média entre 6,69 e 43,52 $\mu\text{g mL}^{-1}$, com a estirpe BR11501 (*Azospirillum lipoferum*) ocupando a melhor média.

Tabela 3 – Concentração de AIA produzido pelas estirpes de bacterianas analisadas do gênero *Bacillus* sp. e fixadores de nitrogênio.

Gênero	Estirpes avaliadas	Produção de AIA ($\mu\text{g/mL}$)	EPM
<i>Bacillus</i> sp.	BR 10788	46,063	0,660
	LPPC 136	9,974	0,080
	LPPC 138	20,289	0,200
	LPPC 250	27,533	0,470
	LPPC 259	32,441	0,250
	LPPC 265	35,669	0,210
	LPPC 282	43,176	1,510
	<i>Acidovorax</i> sp.	BR 11652	15,066
	BR 11676	8,635	0,857
<i>Rhizobium</i> sp.	BR 12157	17,480	1,161
<i>Herbaspirillum</i> sp.	BR 11674	6,693	0,273
<i>Azospirillum</i> sp.	BR 11501	43,517	4,002

Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 2 – Análise para produção do ácido indolacético (AIA) complementado com o reagente de Salkowski.

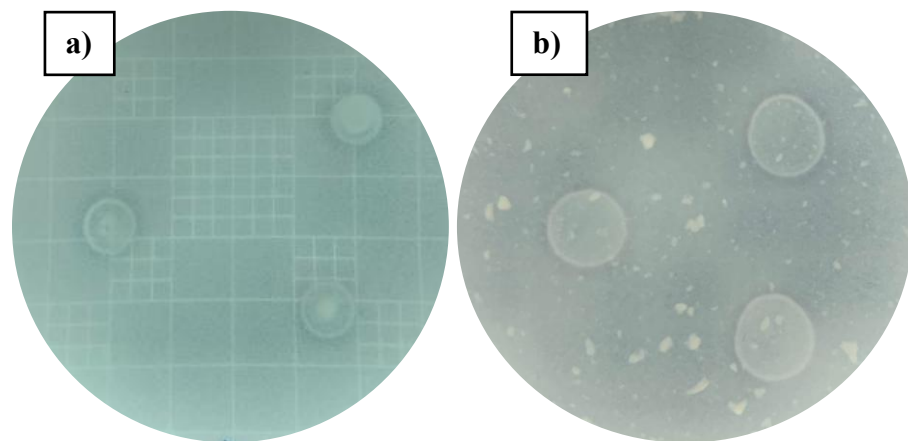


Fonte: Dados da pesquisa. **a)** Curva padrão de AIA (primeiro tubo controle). **b)** Bactérias do gênero *Bacillus*; **c** y **d)** Bactérias fixadoras de nitrogênio (primeiro tubo controle).

6.1.3 Solubilização e mineralização de fosfato

Na solubilização de fósforo, somente o 58,33% das estirpes apresentaram positivo na formação de halo no meio de cultura Pikovskaya (PVK) enriquecido com fosfato de cálcio $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. Em relação as estirpes do gênero *Bacillus* sp., o 71,4% foram testadas e consideradas como solubilizadoras de P com um índice de solubilização (IS) entre 0,87 e 1,13, sendo a estirpe LPPC138 que obteve o maior índice seguida de LPPC136 com 1,12. Apenas 40% das estirpes fixadoras de nitrogênio, BR12157 (*Rhizobium* sp.) e BR11501 (*Azospirillum* sp.) apresentaram formação de halo com valores entre 1,06 e 1,15. Enquanto para os resultados da mineralização de fósforo apenas a estirpe LPPC259 (*Bacillus subtilis*) apresentou a formação de halo em meio PVK com adição de lecitina de soja com um índice de mineralização (IM) de 1,09. Esses valores obtidos de toda as estirpes foram classificados como índices de baixa solubilização e/ou mineralização ao ser inferiores a 2.

Figura 3 – Testes de solubilização e mineralização de fósforo em meio de cultura Pikovskaya PVK enriquecido com fosfato de cálcio para solubilização e com lecitina de soja para mineralização.



Fonte: Dados da pesquisa. **a)** Resultado positivo (presencia de halo ao redor da colônia) para solubilização em meio de cultura PVK complementado com fosfato de cálcio. **b)** Resultado positivo (presencia de halo ao redor da colônia) para mineralização em meio de cultura PVK suplementado com lecitina de soja.

Tabela 4 – Índices de solubilização (IS) obtidos pelas estirpes bacterianas aos 15 dias de crescimento

Gênero	Estirpes avaliadas	Índice de solubilização (IS)	EPM	Classificação
<i>Bacillus</i> sp.	BR 10788	1,08	0,01	Baixo
	LPPC 136	1,12	0,00	Baixo
	LPPC 138	1,13	0,00	Baixo
	LPPC 250	1,00	0,00	Baixo
	LPPC 259	1,16	0,03	Baixo
	LPPC 265	1,12	0,00	Baixo
	LPPC 282	1,00	0,00	Baixo
<i>Acidovorax</i> sp.	BR 11652	1,00	0,00	Baixo
	BR 11676	1,00	0,00	Baixo
<i>Rhizobium</i> sp.	BR 12157	1,06	0,01	Baixo
<i>Herbaspirillum</i> sp.	BR 11674	1,00	0,00	Baixo
<i>Azospirillum</i> sp.	BR 11501	1,15	0,02	Baixo

Fonte: Dados da pesquisa.

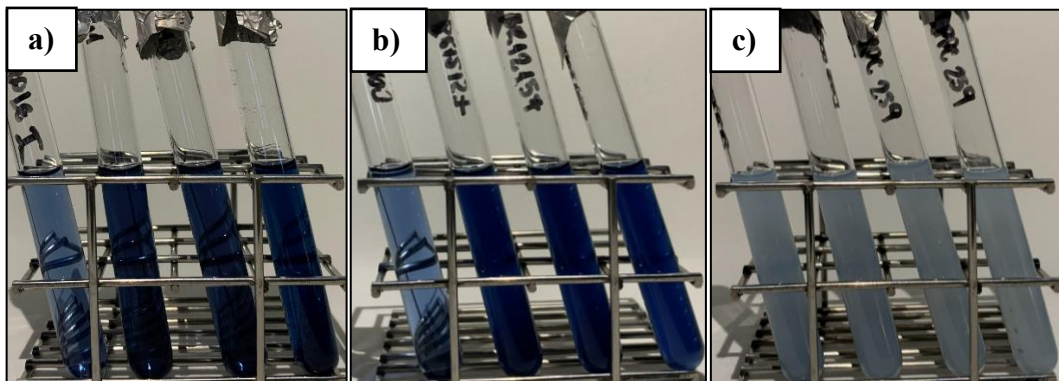
Tabela 5 – Índices de mineralização (MI) obtidos pelas estirpes bacterianas aos 15 dias de crescimento.

Gênero	Estirpes avaliadas	Índice de mineralização (IM)	EPM	Classificação
<i>Bacillus</i> sp.	BR 10788	1,00	0,00	Baixo
	LPPC 136	1,00	0,00	Baixo
	LPPC 138	1,00	0,00	Baixo
	LPPC 250	1,00	0,00	Baixo
	LPPC 259	1,09	0,01	Baixo
	LPPC 265	1,00	0,00	Baixo
	LPPC 282	1,00	0,00	Baixo
<i>Acidovorax</i> sp.	BR 11652	1,00	0,00	Baixo
	BR 11676	1,00	0,00	Baixo
<i>Rhizobium</i> sp.	BR 12157	1,00	0,00	Baixo
<i>Herbaspirillum</i> sp.	BR 11674	1,00	0,00	Baixo
<i>Azospirillum</i> sp.	BR 11501	1,00	0,00	Baixo

Fonte: Dados da pesquisa.

As estirpes que testaram positivo para solubilização passaram pela reação colorimétrica do reagente de ácido ascórbico o que demonstrou a liberação de P solúvel ao mudar a coloração em referência ao controle, resultando em positivo para as estirpes do gênero *Bacillus* sp. LPPC136, LPPC138, LPPC 259, LPPC265 e BR10788, e para as estirpes fixadoras de N BR11501 (*Azospirillum* sp.) e BR12157 (*Rhizobium* sp.). As estirpes para mineralização de P solúvel não diferiram do controle sem inoculação com adição do reagente colorimétrico (Figura 4).

Figura 4 – Reação do reagente colorimétrico de ácido ascórbico com o fosfato solúvel produzido pelas estirpes bacterianas em meio de cultura PVK.

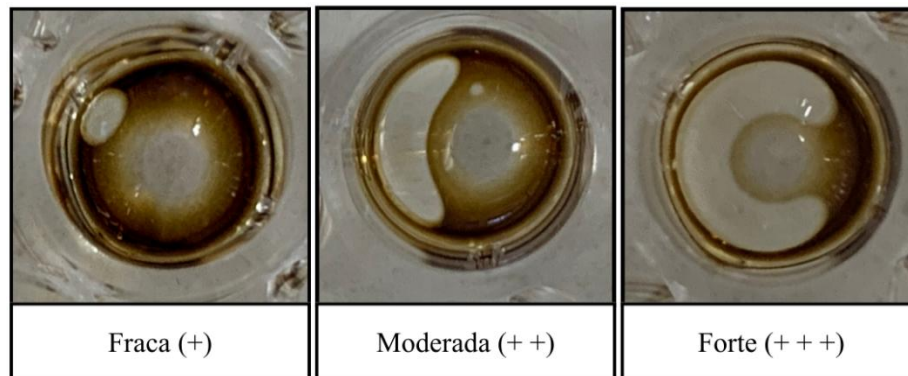


Fonte: Dados da pesquisa. a) Bactérias do gênero *Bacillus* y b) Bactérias fixadoras de nitrogênio sendo positivo para solubilização com fosfato de cálcio; c) Teste negativo para mineralização com lecitina de soja ao comparar com o controle (primeiro tubo).

6.1.4 Produção de biossurfactantes

Os resultados obtidos na análise colapso da gota (Figura 5) indicam que todas as estirpes do gênero *Bacillus* sp. apresentaram uma atividade biossurfactante classificada como fraca, no entanto para as estirpes fixadoras de N apenas a estirpe BR11501 (*Azospirillum* sp.) foi classificada com uma atividade biossurfactante forte, seguida de BR11652 e BR11676 (*Acidovorax* sp.), BR11674 (*Herbaspirillum* sp.) que foram classificadas com uma atividade moderada e finalmente a estirpe BR12157 (*Rhizobium* sp.) com uma atividade biossurfactante fraca.

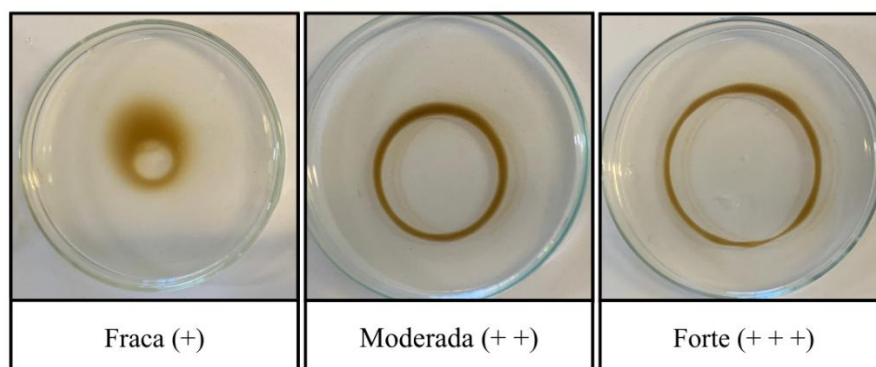
Figura 5 – Atividade biossurfactante avaliada no teste colapso da gota realizado nas estirpes bacterianas.



Fonte: Dados da pesquisa.

O ensaio qualitativo para produção de biossurfactantes foi o teste de dispersão em óleo (Figura 6), sendo duas estirpes do gênero *Bacillus* sp. LPPC259 e LPPC265 classificadas como uma atividade biossurfactante forte ocupando três quadrantes, distintamente das estirpes LPPC136, LPPC138, LPPC250, LPPC282 e BR10788 as quais apresentaram uma atividade de biossurfactante moderada apenas ocupando dois quadrantes. As bactérias fixadoras de nitrogênio mostraram quatro estirpes com atividade biossurfactante forte, a BR11501 (*Azospirillum* sp.), BR11674 (*Herbaspirillum* sp.), BR11676 (*Acidovorax* sp.) ocupando três quadrantes e BR11652 (*Acidovorax* sp.) com quatro quadrantes, diferentemente da estirpe BR12157 (*Rhizobium* sp.) com uma atividade moderada ao ocupar dois quadrantes (Tabela 6).

Figura 6 – Atividade biossurfactante avaliada no teste dispersão em óleo realizado pelas estirpes bacterianas.



Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 6 – Resultado da avaliação da atividade de biossurfactante das estirpes bacterianas.

Gênero	Estirpe	Colapso da gota	Dispersão em óleo
<i>Bacillus</i> sp.	BR 10788	++	+
	LPPC 136	++	+
	LPPC 138	++	+
	LPPC 250	++	+
	LPPC 259	+++	+
	LPPC 265	+++	+
	LPPC 282	++	+
<i>Acidovorax</i> sp.	BR 11652	+++	++
	BR 11676	+++	++
<i>Rhizobium</i> sp.	BR 12157	++	+
<i>Herbaspirillum</i> sp.	BR 11674	+++	++
<i>Azospirillum</i> sp.	BR 11501	+++	+++

Fonte: Dados da pesquisa.

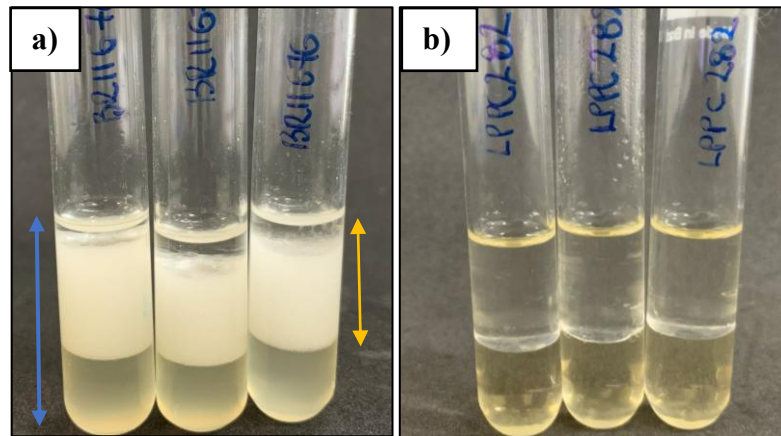
Com relação com a análise da atividade de emulsificação, as estirpes foram avaliadas por meio da formação da coluna de emulsão e a sua estabilidade por 48h e 72h (Figura 7). Apenas a estirpe LPPC282 do gênero *Bacillus* sp. não apresentou formação da coluna de emulsão e para as demais estirpes de *Bacillus* sp. apresentaram um índice de emulsão e estabilidade um intervalo entre 2,09% e 15,97% até as 48h, em 72h os valores dos índices variaram entre 3,10% e 15,20%. As estirpes fixadoras de N apresentaram um índice de emulsão e estabilidade com intervalos de 22,57% e 68,02% até as 48h, mas em 72h diminuíram para um índice de 0% (Tabela 7).

Tabela 7 – Índice de emulsificação e estabilidade de emulsão pelas estirpes bacterianas avaliadas.

Gênero	Estirpe	E24h	EPD	E48h	EPD	E72h	EPD
<i>Bacillus</i> sp.	BR 10788	2%	1%	2%	1%	3%	1%
	LPPC 136	3%	0%	3%	0%	2%	1%
	LPPC 138	3%	0%	3%	0%	3%	0%
	LPPC 250	16%	3%	16%	3%	15%	3%
	LPPC 259	14%	1%	11%	1%	7%	1%
	LPPC 265	3%	0%	3%	0%	3%	0%
	LPPC 282	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<i>Acidovorax</i> sp.	BR 11652	42%	6%	42%	6%	0%	0%
	BR 11676	50%	2%	52%	1%	0%	0%
<i>Rhizobium</i> sp.	BR 12157	23%	1%	23%	1%	0%	0%
<i>Herbaspirillum</i> sp.	BR 11674	56%	0%	55%	0%	0%	0%
<i>Azospirillum</i> sp.	BR 11501	68%	1%	68%	1%	0%	0%

Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 7 – Teste de emulsificação e estabilidade da coluna de emulsão obtidos das estirpes bacterianas utilizadas.



Fonte: Dados da pesquisa. a) Formação da coluna de emulsificação. Setas azul = coluna total, seta amarela = coluna de emulsificação. b) Ausência da coluna de emulsificação.

6.1.5 Síntese e produção de sideróforos

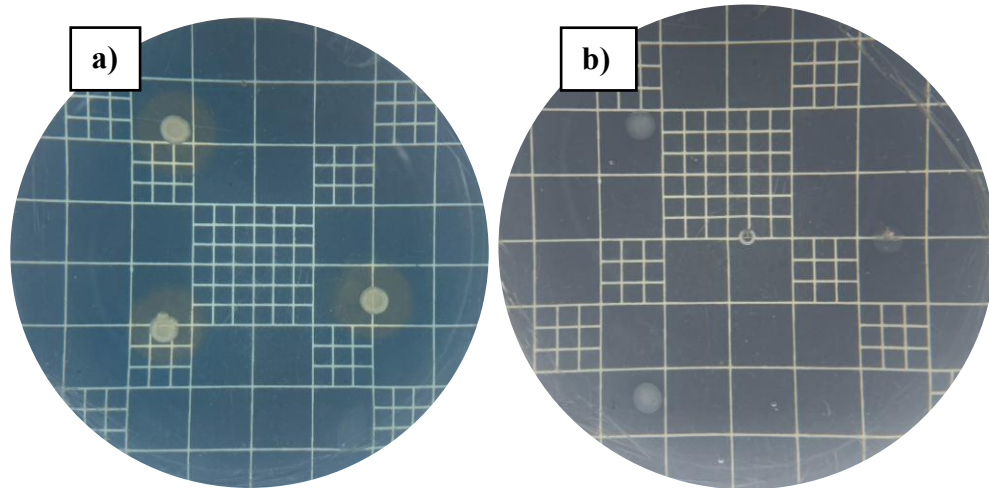
Na síntese de produção de sideróforos se avaliaram toda as estirpes pela formação de halo de coloração laranja ou rosa ao redor da colônia (Figura 8), e resultando em positiva apenas para três estirpes fixadoras de N com um índice de produção (IPS) de 1,24 e 2,06, sendo a estirpe BR11652 (*Acidovorax* sp.) a maior produtora seguida de BR11676 do mesmo gênero e BR11674 (*Herbaspirillum* sp.) (Tabela 8).

Tabela 8 – Índice da síntese de produção de sideróforos obtidos pelas estirpes bacterianas inoculadas em meio de cultura ágar King B suplementado com o corante cromoazurol S (CAS)

Gênero	Estirpes avaliadas	Índice de produção de sideróforos (IPS)	EPM	Classificação
<i>Bacillus</i> sp.	BR 10788	1,00	0,0	Baixo
	LPPC 136	1,00	0,0	Baixo
	LPPC 138	1,00	0,0	Baixo
	LPPC 250	1,00	0,0	Baixo
	LPPC 259	1,00	0,0	Baixo
	LPPC 265	1,00	0,0	Baixo
	LPPC 282	1,00	0,0	Baixo
	<i>Acidovorax</i> sp.	BR 11652	2,06	0,2
BR 11676		1,24	0,1	Baixo
<i>Rhizobium</i> sp.	BR 12157	1,00	0,0	Baixo
<i>Herbaspirillum</i> sp.	BR 11674	1,77	0,2	Baixo
<i>Azospirillum</i> sp.	BR 11501	1,00	0,0	Baixo

Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 8 – Teste para produção de sideróforos realizado para as estirpes bacterianas avaliadas.

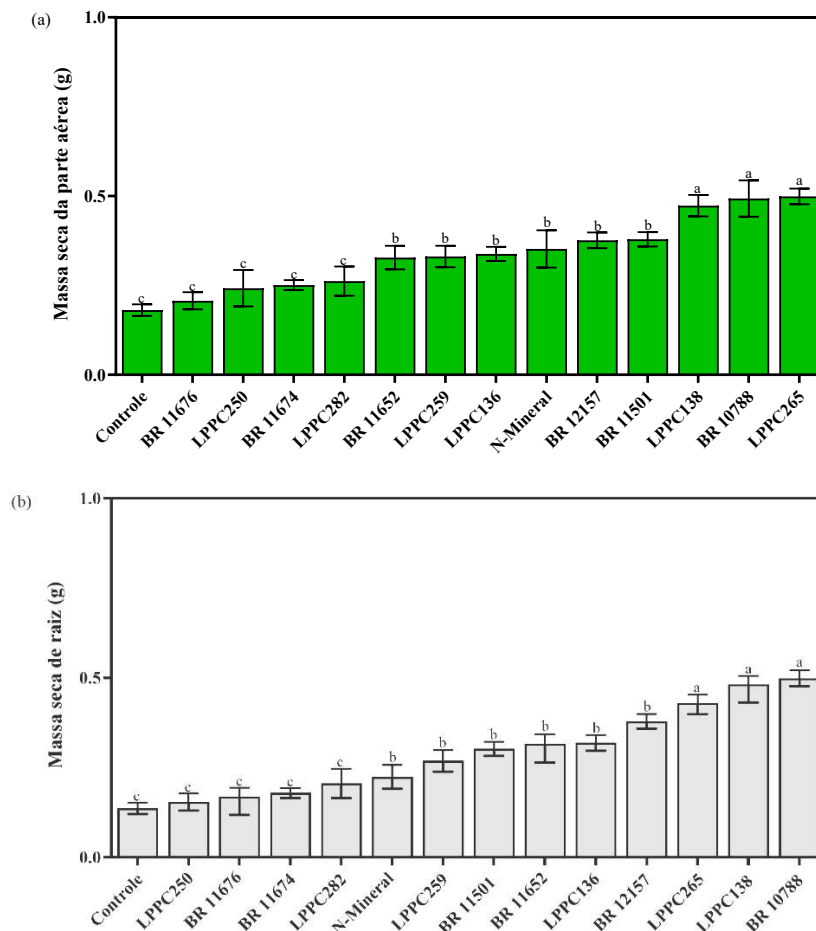


Fonte: Dados da pesquisa. **a)** Resultado positivo (presença de halo) para produção de sideróforos em meio de cultura ágar King B suplementado com o corante cromoazurol S (CAS). **b)** Resultado negativo para produção de sideróforos em meio de cultura ágar King B suplementado com CAS.

6.2 Eficiência agrônômica das estirpes

O primeiro experimento em mudas de bananeira cultivar Prata Catarina de raiz nua com inoculação das 12 estirpes isoladamente, apresentou significância estatística entre os tratamentos sendo as estirpes de *Bacillus* sp. BR10788, LPPC138, LPPC265 que estimularam um maior desenvolvimento na massa de raízes (MSR) de 70,37 e 88,88 % com uma média com intervalos de 0,46 e 0,51 g muda⁻¹ (Figura 9 – a) e na massa da parte aérea (MSPA) um incremento de 34 e 42,86 % obtendo uma média entre 0,47 e 0,50 g muda⁻¹ a diferença do tratamento sub adubação com nitrogênio mineral e o controle sem inoculação (Figura 9 – b).

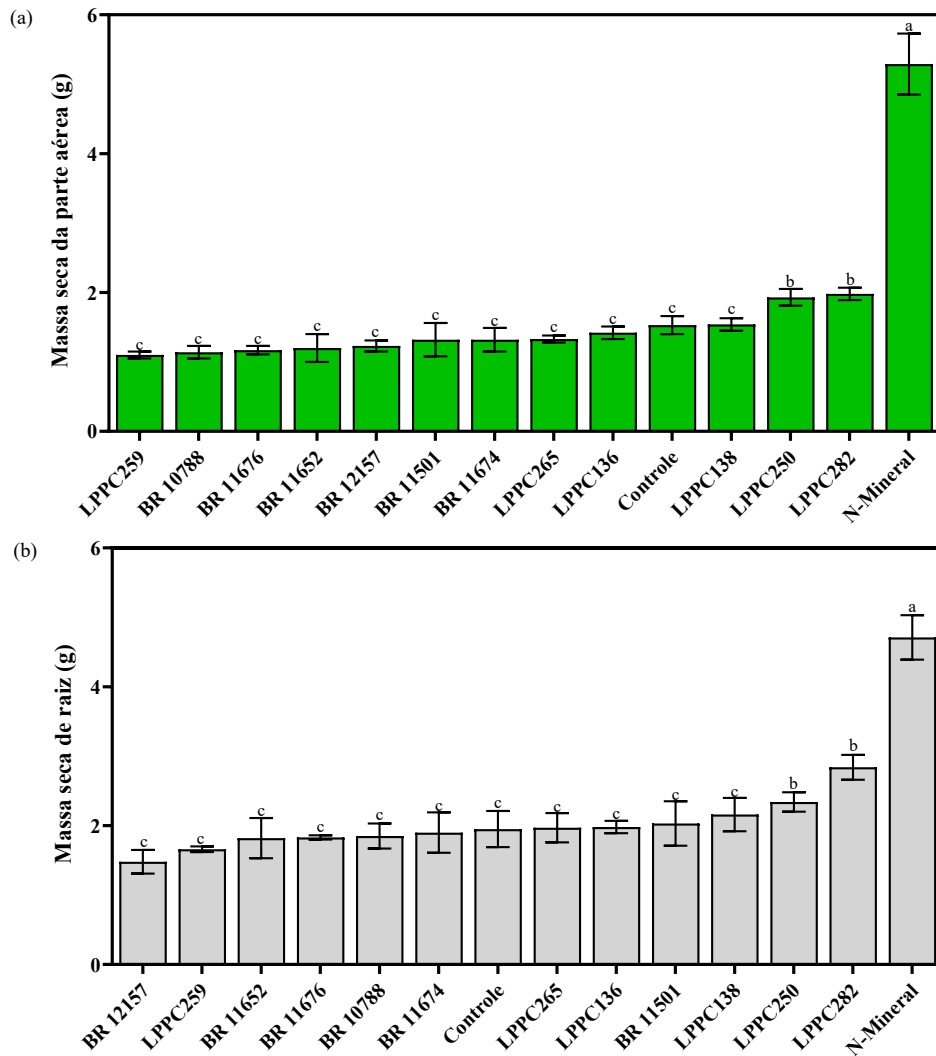
Figura 9 – Massa seca de parte aérea e de raízes de mudas do tipo raiz nua de bananeira cultivar Prata Catarina inoculadas com bactérias promotoras do crescimento vegetal.



Fonte: Dados da pesquisa. **a)** Representação gráfica da massa seca da parte aérea MSPA (g por planta), **b)** de raízes MSR (g por planta) do experimento inoculado isoladamente com as estirpes do gênero *Bacillus* e fixadores de nitrogênio em mudas de bananeira de raiz tipo nua, cultivar Prata Catarina. As barras verticais representam a média e desvio padrão. Controle = Tratamento controle absoluto (sem inoculação e com solução Hoagland sem nitrogênio), N-mineral = Tratamento controle nitrogenado (sem inoculação e com solução Hoagland completa). CV = 23,93% para MSPA; CV = 30,24% para MSR. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott.

O segundo experimento realizado em condições de casa de vegetação com inoculação das 12 estirpes isoladamente nas mudas de bananeira pré-aclimatadas apresentou significância estatística entre os tratamentos (Figura 10 – a), sendo três estirpes do gênero *Bacillus* sp. LPPC138, LPPC250 e LPPC282 que promoveram um aumento de 10,77 e 45,64 % na massa seca das raízes MSR com uma média que varia entre 2,16 e 2,84 g muda⁻¹ em comparação do controle sem inoculação. Da mesma forma as estirpes LPPC250 e LPPC282 mostraram um incremento em 26,14 e 29,41 % na massa da parte aérea MSPA com uma média que varia entre 1,93 e 1,98 g muda⁻¹ ao contrário do tratamento controle (Figura 10 – b).

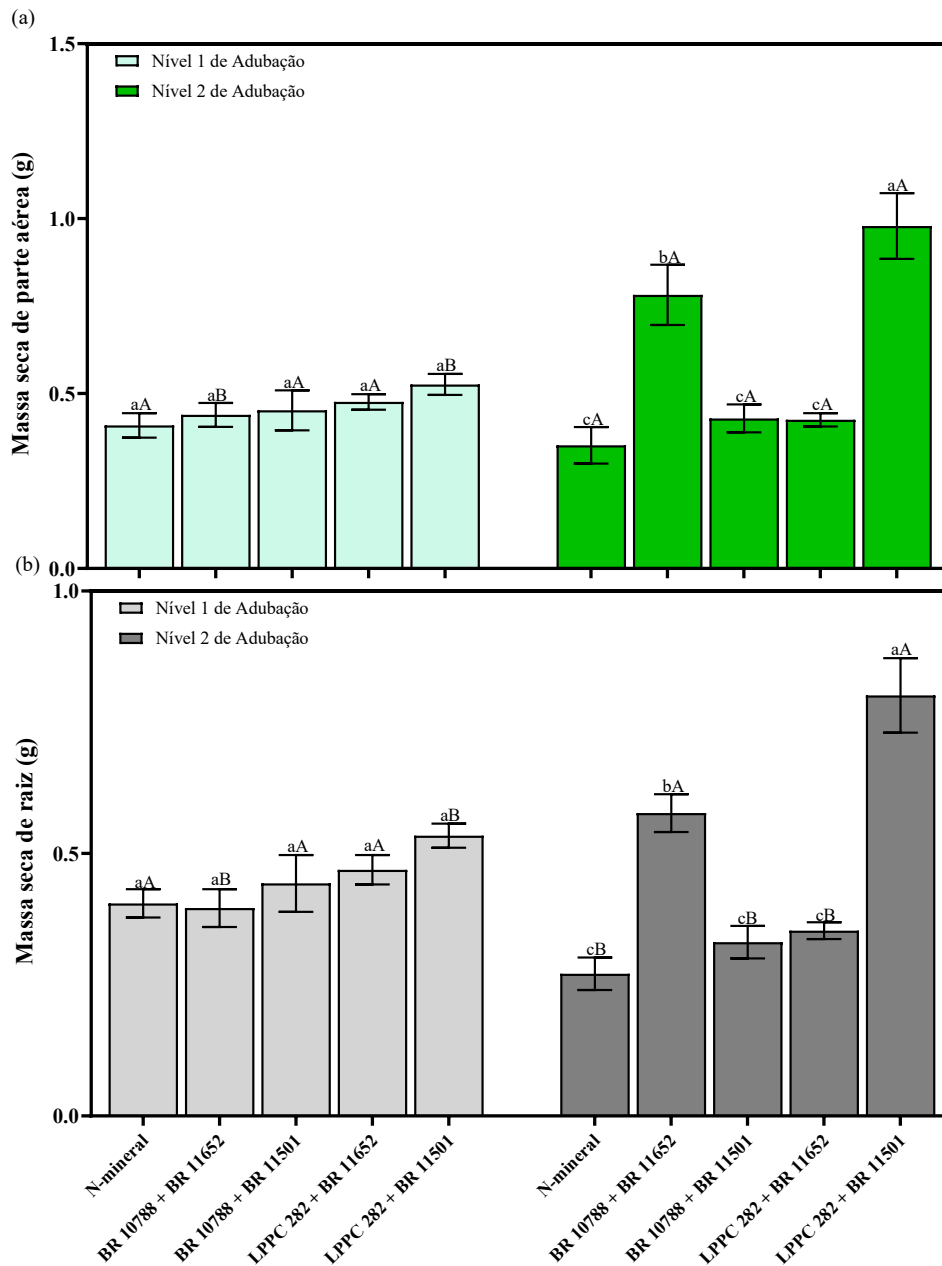
Figura 10 – Massa seca de parte aérea e de raízes de mudas do tipo pré-aclimatadas de bananeira cultivar Prata Catarina inoculadas com bactérias promotoras do crescimento vegetal.



Fonte: Dados da pesquisa. **a)** Representação gráfica da massa seca da parte aérea MSPA (g por planta), **b)** de raízes MSR (g por planta) do experimento inoculado isoladamente com as estirpes do gênero *Bacillus* e fixadores de nitrogênio em mudas de bananeira de raiz tipo pré-aclimatadas, cultivar Prata Catarina. As barras verticais representam a média e desvio padrão. Controle = Tratamento controle absoluto (sem inoculação e com solução Hoagland sem nitrogênio), N-mineral = Tratamento controle nitrogenado (sem inoculação e com solução Hoagland completa). CV = 24,81% para MSPA; CV = 22,82 % para MSR. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott.

O terceiro experimento referente a co-inoculação os melhores tratamentos que apresentaram significância estatística foram as estirpes LPPC282 (*Bacillus* sp.) x BR11501 (*Azospirillum lipoferum*), BR10788 (*Bacillus subtilis*) x BR11652 (*Acidovorax* sp.) com o primeiro nível de adubação, ou seja, duas aplicações solução Hoagland completa (N-mineral) e duas aplicações de solução Hoagland sem nitrogênio, LPPC282 (*Bacillus* sp.) x BR11501 (*Azospirillum lipoferum*) com o segundo nível de adubação, quatro aplicações de solução Hoagland completa (N-mineral) que promoveram maior acúmulo de massa seca de raízes (MSR) entre 35 e 100 % obtendo uma média com valores de 0,54 e 0,80 g muda⁻¹ (Figura 11 – a), na massa seca da parte aérea (MSPA) as estirpes permitiram incrementar em 23,26 e 127,90 % com uma média de 0,53 e 0,98 g muda⁻¹ (Figura 11 – b) a comparação do tratamento sub adubação com nitrogênio mineral com o primeiro nível de adubação.

Figura 11 – Massa seca de parte aérea e de raízes de mudas do tipo raiz nua de banana cultivar Prata Catarina co-inoculadas com bactérias promotoras do crescimento vegetal.



Fonte: Dados da pesquisa. **a)** Representação gráfica da massa seca da parte aérea MSPA (g por planta), **b)** de raízes MSR (g por planta) do experimento com co-inoculação com as estirpes do gênero *Bacillus* e fixadores de nitrogênio selecionadas nos anteriores experimentos em mudas de banana de raiz tipo nua, cultivar Prata Catarina. As barras verticais representam a média e desvio padrão. Nível 1 = Adubação com duas aplicações de solução Hoagland completa (N-mineral) e duas aplicações de solução Hoagland sem N-mineral. Nível 2 = adubação com quatro aplicações de solução Hoagland completa (N-mineral). Controle = Tratamento controle absoluto (sem inoculação e com solução Hoagland sem nitrogênio), N-mineral = Tratamento controle nitrogenado (sem inoculação e com solução Hoagland completa). CV = 25,66 % para MSPA; CV = 20,08 % para MSR. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott.

7 DISCUSSÃO

A capacidade de fixação biológica de nitrogênio (FBN) e a síntese de fitohormônios constituem os principais mecanismos diretos de promoção de crescimento vegetal avaliados neste estudo. A estirpe BR11501 (*Azospirillum lipoferum*) destacou seu potencial ao apresentar a formação de uma película aerotóxica em todos os meios livres de nitrogênio testados, portanto, isso corrobora com HUNGRIA et al. (2013) em seus estudos, onde evidência a alta plasticidade metabólica desse gênero sob diferentes condições de cultura e as distintas fontes de carbono que podem ser utilizadas para seu desenvolvimento nos meios inoculados. SOUZA et al. (2017) e OLIVEIRA et al. (2024) observaram em plantações de banana cultivar Prata Anã e Catarina que a inoculação com isolados do gênero *Bacillus* sp. nas fases iniciais do desenvolvimento pode reduzir a dependência de adubos nitrogenados. Segundo estes autores, os isolados avaliados possuem as características como fixadores biológicos de nitrogênio, solubilizadores de fosfato inorgânico e sintetizadores do ácido indolacético AIA, que promoveram aumento nas massas frescas e secas nas mudas micropropagadas avaliadas.

As estirpes do gênero *Bacillus* sp. BR10788, LPP282 e a estirpe fixadora de nitrogênio BR11501 (*Azospirillum lipoferum*) apresentaram concentrações 46,06 $\mu\text{g mL}^{-1}$, 43,18 $\mu\text{g mL}^{-1}$ e 43,52 $\mu\text{g mL}^{-1}$ respectivamente, sendo os maiores valores na produção de AIA, o que é consistente com os estudos de KHALID et al. (2004) e SPAEPEN et al. (2007), pois indicam que esses gêneros são uns dos principais produtores de fitohormônios entre bactérias que promovem o crescimento. No entanto, os níveis de AIA obtidos para os *Bacillus* foi de 9,98 até 46,06 $\mu\text{g mL}^{-1}$, sendo valores superiores ao ser comparados com o estudo de GHATAGE et al. (2024) no qual trabalharam com isolamentos semelhantes de *Bacillus subtilis* indicando uma produção de AIA de 40,00 $\mu\text{g mL}^{-1}$ o que pode explicar o aumento significativo da massa radicular seca no experimento com mudas pré-aclimatadas e de raízes nuas. IDRIS et al. (2007) relatam resultados semelhantes ao observar um aumento na biomassa radicular em plantas tratadas com inoculação de estirpes produtoras de auxina de *Bacillus*. Da mesma forma, o nível obtido de AIA pela estirpe BR11501 (*Azospirillum lipoferum*) de 43,52 $\mu\text{g mL}^{-1}$, foi um valor inferior de acordo com SANTOS (2024) porque determinaram nos seus estudos valores que variam entre 27,22 $\mu\text{g mL}^{-1}$ e 76,00 $\mu\text{g mL}^{-1}$ o que pode indicar um aumento no comprimento e o número de pelos radiculares, auxiliando a eficiência de absorção de água e nutrientes.

De sete estirpes do gênero *Bacillus* sp. somente cinco foram consideradas como solubilizadoras de fosfato, sendo as estirpes LPPC138, LPPC136, BR10788 e LPPC265, e das cinco estirpes fixadoras de nitrogênio só dois BR12157 (*Rhizobium* sp.) e BR11501 (*Azospirillum lipoferum*) apresentaram a formação de halo, sendo para todas as estirpes classificadas como de baixa solubilização com valores inferiores de índice de solubilização (IS) entre 0,87 e 1,15 a comparação dos valores encontrados por OLIVEIRA (2019) entre 1,37 e 1,87 explicando o potencial das estirpes em quanto a produção de ácidos orgânicos na liberação de fósforo no meio de cultura. Apenas uma estirpe de *Bacillus* sp. LPPC259 foi considerada mineralizadora de fosfato, mas não foi detectada ao confirmar a liberação de fósforo solúvel pela reação colorimétrica do ácido ascórbico, com tudo para as demais estirpes que apresentaram solubilização de fósforo solúvel constata-se que, mesmo assim, em níveis mínimos, esse mecanismo pode ajudar no crescimento das plantas, pois está associado a outros fatores de promoção da planta, como FBN e AIA. Os resultados concordam com as pesquisas de RODRÍGUEZ e FRAGA (1999); KUMAR et al. (2025) e explicam que ainda assim os índices de solubilização e mineralização do fósforo tenham sido classificados como baixos, os resultados são consistentes, nas quais indicam que muitos dos isolados do gênero *Bacillus* sp., *Rhizobium* sp. e *Azospirillum* sp. têm capacidade moderada para solubilização de fosfatos inorgânicos, sendo uma atividade que depende das condições do meio cultura como o aumento no uso de fontes de nitrogênio (nitratos) e uso de altas concentrações de açúcares (glicose) que podem alterar os diâmetros de halos ou ainda assim impedir o desenvolvimento dos isolados. Isso é indicado pelo estudo de SHARMA et al. (2013), mostrando que o efeito combinado desses mecanismos pode resultar em rendimentos agrônômicos significativos, mesmo quando a solubilização de P não é alta.

A avaliação conjunta dos testes qualitativos de colapso da gota e dispersão em óleo permitiu identificar diferenças claras no potencial de produção de biossurfactantes entre as estirpes avaliadas. No teste de colapso da gota, todas as estirpes do gênero *Bacillus* sp. apresentaram atividade fraca, indicando baixa eficiência na redução imediata da tensão superficial, comportamento que pode estar relacionado à elevada variabilidade intraespecífica e à dependência das condições de cultivo para a síntese de lipopeptídeos como surfactinas, iturinas e fengicinas (DESAI e BANAT, 1997; SATPUTE et al., 2010; YOUSSEF et al., 2004). Em contraste, entre as bactérias fixadoras de nitrogênio, BR11501 (*Azospirillum lipoferum*) destacou-se com atividade forte, enquanto BR11652 e BR11676 (*Acidovorax* spp.) e BR11674 (*Herbaspirillum* sp.) apresentaram atividade moderada, evidenciando maior potencial para a produção de compostos anfífilos associados à adesão radicular e formação de biofilmes

(BASHAN et al., 2014; SATPUTE et al., 2010). No teste de dispersão em óleo, as estirpes *Bacillus* sp. LPPC259 e LPPC265 apresentaram atividade forte, sugerindo a produção de biossurfactantes lipopeptídicos capazes de mobilizar fases hidrofóbicas, enquanto *Azospirillum* sp., *Herbaspirillum* sp. e *Acidovorax* sp. também demonstraram elevado desempenho, corroborando relatos de que esses gêneros produzem metabólitos extracelulares com função bioemulsificante (MORIKAWA et al., 2000; BASHAN et al., 2014; UZOIGWE et al., 2015).

A análise da atividade emulsificante complementou os testes qualitativos ao evidenciar diferenças no tipo e na estabilidade dos compostos produzidos. As estirpes de *Bacillus* sp. apresentaram baixos índices de emulsificação (< 20%), porém com relativa estabilidade até 72 h, indicando a produção de biossurfactantes de baixa massa molecular com alta capacidade de redução da tensão superficial, mas menor eficiência na estabilização de emulsões (COOPER e GOLDENBERG, 1987; SATPUTE et al., 2010). Por outro lado, as estirpes fixadoras de nitrogênio exibiram altos índices iniciais de emulsificação (>60%) nas primeiras 48 h, seguidos de perda total da estabilidade em 72 h, sugerindo a produção de bioemulsificantes instáveis ou metabólitos extracelulares de curta duração, possivelmente associados a exopolissacarídeos e lipopolissacarídeos, comuns em *Azospirillum* sp. e *Herbaspirillum* sp. (BASHAN et al., 2014). Assim, os resultados indicam que *Bacillus* sp. LPPC259 e LPPC265, e as fixadoras de nitrogênio BR11501 (*Azospirillum lipoferum*), BR11652 e BR11676 (*Acidovorax* sp.) e BR11674 (*Herbaspirillum* sp.) apresentam maior potencial para a produção de compostos com atividade biossurfactante, ainda que por mecanismos e perfis funcionais distintos.

A produção de sideróforos pelas estirpes bacterianas foram avaliadas pela formação de halo com coloração laranja em meio CAS, observando apenas em três estirpes fixadoras de nitrogênio atividade positiva com índices de produção de sideróforos (IPS) que variam entre 1,58 e 2,06, sendo as estirpes BR11652 e BR11676 (*Acidovorax* spp.), BR11674 (*Herbaspirillum*). Esses resultados concordam com os estudos de NEILANDS (1995); CROWLEY (2006) porque explicam que esse mecanismo ajuda na competição pelo ferro na rizosfera e como uma promoção indireta do crescimento das plantas. No entanto, AHMED e HOLMSTRÖM (2014) mencionam que a produção de sideróforos nem sempre resulta em um aumento imediato da biomassa, mas contribui para um ambiente rizosférico equilibrado que favorece o crescimento ao melhorar o estado nutricional das plantas e reduzir a incidência de microrganismos fitopatogênicos.

Os três experimentos realizados em condições de casa de vegetação exibiram que as estirpes bacterianas avaliadas possuem potencial na promoção de crescimento tanto na

inoculação isolada como na co-inoculação porque apresentaram significância estatística no crescimento e acúmulo de biomassa em mudas de bananeira cultivar Prata Catarina. No primeiro experimento em mudas de bananeira tipo raiz nua com inoculação individual das 12 estirpes, observou-se que as estirpes de *Bacillus* sp. BR10788, LPPC138, LPPC265 estimularam um maior desenvolvimento na massa seca de raízes MSR e massa seca da parte aérea MSPA, superando o tratamento controle com N-mineral e sem inoculação. O incremento na MSR até de 88,88% e na MSPA de 42,86% deve-se que essas estirpes apresentam a capacidade para estimular o crescimento radicular e aumentar o desenvolvimento vegetativo na ausência de adubação com nitrogênio mineral, o que explica que o aumento na eficiência de absorção radicular pode-se relacionar com mecanismos de promoção de crescimento como a produção de fitormônios e a solubilização de nutrientes BORBA et al. (2021). SOUZA et al. (2013) e SILVA et al. (2011) ao trabalhar com bananeira com inoculação de *Bacillus* corroboraram que na fase inicial da cultura houve um incremento significativo no crescimento, associado com à produção de fitohormônios e à fixação biológica de nitrogênio. Os resultados validam essa associação, visto que a estirpe BR10788 (*Bacillus subtilis*) destacou-se com uma produção de AIA de 46,06 $\mu\text{g mL}^{-1}$ in vitro (Tabela 3), justificando o maior desenvolvimento radicular observado. Além disso, a capacidade de Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) identificada qualitativamente nas estirpes BR11501 (*Azospirillum lipoferum*) e BR11652 (*Acidovorax* sp.) complementa a ação hormonal, oferecendo um suporte nutricional direto à planta. Essa dupla aptidão das bactérias selecionadas explica os ganhos de biomassa obtidos, alinhando-se aos mecanismos de promoção de crescimento descritos na literatura para a cultura da bananeira.

O segundo experimento com inoculação das 12 estirpes isoladamente em mudas de bananeira pré-aclimatadas indicou que as estirpes de *Bacillus* sp. LPPC138 demonstrou maior eficiência na solubilização de fosfatos, LPPC250 e LPPC282 evidenciaram seu potencial principalmente através da elevada síntese de AIA, atuando como um estimulador direto do alongamento radicular promovendo aumentos até 45,64 % na massa seca das raízes MSR e 29,41 % na massa da parte aérea MSPA em comparação do controle sem inoculação. O efeito benéfico da inoculação em mudas de bananeira já estabelecidas pode se relacionar com que essas estirpes conservam uma atividade metabólica eficiente na rizosfera, que ajuda na absorção de nutrientes e desenvolvimento da planta. VESSEY (2003) e COMPANT et al. (2005) nos seus estudos especificam que as espécies do gênero *Bacillus* apresentaram uma capacidade persistente na colonização radicular além de ter tolerância a condições ambientais adversas.

O terceiro experimento mostrou que os tratamentos de co-inoculação com as estirpes de *Bacillus* e as bactérias fixadoras de nitrogênio estimularam ainda mais no desenvolvimento das mudas de bananeira de tipo raiz nua. Não se observou diferença estatística significativa entre os tratamentos no nível mais baixo de adubação nitrogenada (Nível 1). Por outro lado, a inoculação com as estirpes LPPC282 (*Bacillus* sp.) x BR11501 (*Azospirillum lipoferum*) e BR10788 (*Bacillus subtilis*) x BR11652 (*Acidovorax* sp.) com aplicação de solução de Hoaglando completa quatro vezes promoveu acúmulo de massa seca superior quando comparado com os demais tratamentos de inoculação. Os resultados indicam o potencial sinérgico da co-inoculação, posto que os *Bacillus* sp. facilitam a solubilização de nutrientes e metabólitos bioativos, por outro lado *Azospirillum* e *Acidovorax* contribuem na fixação biológica de nitrogênio e na produção de auxinas. Essa complementaridade funcional ficou evidente no desempenho agrônômico, onde o SynCom promoveu incrementos expressivos de até 127,90% na massa seca da parte aérea e 100% nas raízes, superando as limitações das inoculações individuais. A interação entre a alta produção de AIA pela estirpe BR10788 e a capacidade de FBN e síntese de biossurfactantes das estirpes BR11501 (*Azospirillum lipoferum*) e BR11652 (*Acidovorax* sp.) criou um ambiente favorável para o desenvolvimento vegetal, mesmo sob restrição de nitrogênio. Dessa forma, o uso de consórcios microbianos se apresenta como uma estratégia viável para reduzir a dependência de fertilizantes sintéticos, garantindo a sustentabilidade da produção (KAMINSKY et al., 2019; SHAYANTHAN et al., 2022). Portanto, concordam com BASHAN e De-BASHAN (2010); GALINDO et al. (2025) porque demonstram que a co-inoculação com as estirpes de *Bacillus* sp. com *Azospirillum* sp. aumentam a eficiência na presença de nitrogênio, o que representa incrementos na biomassa e um melhor desenvolvimento fisiológico.

8 CONCLUSÃO

A caracterização *in vitro* revelou que as estirpes avaliadas possuem múltiplos mecanismos de promoção de crescimento, com destaque para a produção de ácido indol-3-acético (AIA), onde as estirpes BR10788 (*Bacillus subtilis*) e BR11501 (*Azospirillum lipoferum*) apresentaram as maiores concentrações (46,06 e 43,51 $\mu\text{g mL}^{-1}$, respectivamente). Além disso, a capacidade de fixação biológica de nitrogênio e a produção de metabólitos secundários confirmaram o potencial biotecnológico desses isolados, destacando-se a estirpe BR11501 (*Azospirillum lipoferum*) pela consistência na atividade de FBN e produção de biossurfactantes, e a estirpe BR11652 (*Acidovorax sp.*) pela eficiente síntese de sideróforos e compostos tensoativos como atividade biossurfactante.

Em ensaios individuais sob condições controladas, as estirpes de *Bacillus sp.* (LPPC138, LPPC250 e LPPC282) demonstraram elevada eficiência agrônômica, promovendo incrementos significativos na massa seca de raízes e da parte aérea em mudas de bananeira cv. Prata Catarina, tanto em sistema de raiz nua quanto em mudas pré-aclimatadas, indicando uma colonização radicular eficiente.

A construção da comunidade microbiana sintética (SynCom) via co-inoculação evidenciou um efeito sinérgico superior à inoculação individual. Os consórcios formados por LPPC282 (*Bacillus sp.*) x BR11501 (*Azospirillum lipoferum*) e BR10788 (*Bacillus subtilis*) x BR11652 (*Acidovorax sp.*) escolhidos pela complementaridade funcional entre a alta produção de auxinas dos *Bacillus* e a capacidade de fixação de nitrogênio e produção de sideróforos dos diazotróficos, foram os mais promissores. Essas combinações proporcionaram aumentos de até 127,90% na massa seca da parte aérea e 100% na massa seca de raízes em comparação ao tratamento com adubação mineral convencional.

Confirma-se a hipótese de que a utilização de SynCom permite a redução da adubação nitrogenada química. Os resultados demonstram que a co-inoculação de rizobactérias multifuncionais supre parcialmente a demanda nutricional da bananeira na fase de muda, mantendo o vigor e o acúmulo de biomassa mesmo sob regime de adubação nitrogenada reduzida, consolidando-se como uma estratégia sustentável para a bananicultura no Ceará.

REFERÊNCIAS

- AHMED, E.; HOLMSTRÖM, S. J. M. Siderophores in environmental research: roles and applications. **Microbial Biotechnology**, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 196–208, 27 maio 2014.
- ALEXANDER, D. B.; ZUBERER, D. A. Use of chrome azurol S reagents to evaluate siderophore production by rhizosphere bacteria. **Biology and Fertility of Soils**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 39–45, set. 1991.
- ALMEIDA, Izabel. **Fontes e doses de nitrogênio na cultura da banana em região semiárida**. 2017. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- ANDRADE, Leandro Fernandes *et al.* Analysis of the abilities of endophytic bacteria associated with banana tree roots to promote plant growth. **Journal of Microbiology**, [s. l.], v. 52, n. 1, p. 27–34, jan. 2014.
- ARANTES, Alessandro de Magalhães *et al.* Agronomic evaluation of banana plants in three production cycles in southwestern state of Bahia. **Revista Brasileira de Fruticultura**, [s. l.], v. 39, n. 1, 2017.
- ARAÚJO, Dayane Aparecida de Oliveira *et al.* Morfometria de Bananeira Nanica em seu primeiro ciclo vegetativo: efeitos da adubação com pó de rocha de diferentes origens. **Peer Review**, [s. l.], v. 6, n. 9, p. 152–165, 20 abr. 2024.
- ARAUJO, Fabio Fernando de; GUABERTO, Luciana Machado; SILVA, Iassanã Francisco da. Bioprospecção de rizobactérias promotoras de crescimento em *Brachiaria brizantha*. **Revista Brasileira de Zootecnia**, [s. l.], v. 41, n. 3, p. 521–527, mar. 2012.
- ARAUJO, Fabio Fernando de; GUERREIRO, Renato Tadeu. Bioprospecção de isolados de *Bacillus* promotores de crescimento de milho cultivado em solo autoclavado e natural. **Ciência e Agrotecnologia**, [s. l.], v. 34, n. 4, p. 837–844, ago. 2010.
- BACKER, Rachel *et al.* Plant Growth-Promoting Rhizobacteria: Context, Mechanisms of Action, and Roadmap to Commercialization of Biostimulants for Sustainable Agriculture. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 9, p. 1473, 23 out. 2018.
- BAIS, Harsh P. *et al.* The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. **Annual Review of Plant Biology**, [s. l.], v. 57, n. 1, p. 233–266, 1 jun. 2006.
- BASET, M. *et al.* Effect of plant growth promoting rhizobacterial (PGPR) inoculation on growth and nitrogen incorporation of tissue-cultured *Musa* plantlets under nitrogen-free hydroponics condition. **Australian Journal of Crop Science**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 85–90, 2010.
- BASHAN, Yoav *et al.* Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: formulations and practical perspectives (1998–2013). **Plant and Soil**, [s. l.], v. 378, n. 1–2, p. 1–33, 19 maio 2014.

BASHAN, Yoav; DE-BASHAN, Luz E. How the Plant Growth-Promoting Bacterium *Azospirillum* Promotes Plant Growth—A Critical Assessment. **Advances in Agronomy**, [s. l.], v. 108, p. 77–136, 2010.

BERRAQUERO, F.; BAYA, Ana; RAMOS, A. Establecimiento de índices para el estudio de la solubilización de fosfatos por bacterias del suelo. **Ars Pharmaceutica**, [s. l.], v. 17, p. 399–406, 1976.

BORBA, Aloísio *et al.* *Bacillus* sp. como promotor de crescimento em soja. **Revista de Ciências Agrárias**, [s. l.], v. 44, n. 2–3, p. 71–80, 2021.

BORGES, Ana; SILVA, Luciano. **O cultivo da Bananeira**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2004.

BORHAM, Ali *et al.* Phosphate Solubilization by *Enterobacter cloacae* and its Impact on Growth and Yield of Wheat Plants. **Journal of Sustainable Agricultural Sciences**, [s. l.], v. 43, n. 2, p. 89–103, 30 jul. 2017.

CASTRICINI, Ariane *et al.* Caracterização pós-colheita e sensorial de genótipos de bananeiras tipo Prata. **Revista Brasileira de Fruticultura**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 27–37, mar. 2015.

COMPANT, Stéphane *et al.* Use of plant growth-promoting bacteria for biocontrol of plant diseases: principles, mechanisms of action, and future prospects. **Applied and Environmental Microbiology**, [s. l.], v. 71, n. 9, p. 4951–4959, set. 2005.

COOPER, David G.; GOLDENBERG, Beena G. Surface-Active Agents from Two *Bacillus* Species. **Applied and Environmental Microbiology**, [s. l.], v. 53, n. 2, p. 224–229, fev. 1987.

CROWLEY, David E. Microbial Siderophores in the Plant Rhizosphere. In: BARTON, L.; ABADÍA, J. (Ed.). **Iron Nutrition in Plants and Rhizospheric Microorganisms**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2006. p. 169–198.

DE OLIVEIRA-PAIVA, Christiane Abreu *et al.* Inoculation with *Bacillus megaterium* CNPMS B119 and *Bacillus subtilis* CNPMS B2084 improve P-acquisition and maize yield in Brazil. **Frontiers in Microbiology**, [s. l.], v. 15, 26 jun. 2024.

DE SOUZA, Rafael Soares Correa; ARMANHI, Jaderson Silveira Leite; ARRUDA, Paulo. From Microbiome to Traits: Designing Synthetic Microbial Communities for Improved Crop Resiliency. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 11, 27 ago. 2020.

DESAI, J. D.; BANAT, I. M. Microbial production of surfactants and their commercial potential. **Microbiology and Molecular Biology Reviews**, [s. l.], v. 61, n. 1, p. 47–64, mar. 1997.

FAOSTAT. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **World Banana Production Statistics for 2023**. Roma: FAO, 2023. Disponível em: Acesso em: 10 jan. 2025.

FERREIRA, Daniel Furtado. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, [s. l.], v. 35, n. 6, p. 1039–1042, dez. 2011.

FRANCISCO, Rafaela S.; PEDROSO, Gabriel de S. G.; VENTURA, Thiago M. Aplicação de Redes Neurais Convolucionais para Classificação de Imagens de Estágios de Maturação da Banana Prata Catarina. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE COMPUTAÇÃO, 2024. **Anais...** [s. l.]: SBC, 2024.

GALINDO, Fernando Shintate *et al.* Synergism of *Bacillus subtilis* and *Azospirillum brasilense* for enhanced N-use efficiency and maize growth: Evidence from N isotopic and physiological responses. **Physiologia Plantarum**, [s. l.], v. 177, n. 2, 7 mar. 2025.

GARANTIZADO, Halline *et al.* Agentes Gelificantes Alternativos na Micropropagação de Bananeira cv. Prata Catarina. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, p. 4–18, 2012.

GAZOLLA VOLPIANO, Camila *et al.* Análise Fisiológica do Co-cultivo das BPCV *Herbaspirillum seropedicae* SmR1 e *Azospirillum brasilense* AbV5 com Plântulas de Trigo in vitro sob Condições de Estresse Hídrico. **BBR - Biochemistry and Biotechnology Reports**, [s. l.], v. 2, n. 3esp, p. 94, 2 ago. 2013.

GHATAGE, Abhay; BACHANE, Prajakta Sanjay; NANAWARE, Jayashri. Isolation and Characterization of Plant Growth-Promoting Microorganisms from Heavy Metal Contaminated Soil. **Bulletin of Pure and Applied Sciences- Zoology**, [s. l.], v. 43B, n. 1s, p. 122–134, 2024.

GLICK, Bernard R. Plant Growth-Promoting Bacteria: Mechanisms and Applications. **Scientifica**, [s. l.], p. 1–15, 2012.

GOMES, P. L. *et al.* Qualidade pós-colheita da banana ‘Prata Catarina’ em diferentes estádios de maturação. In: **Tecnologias Aplicadas ao Manejo Pós-Colheita de Frutas, Flores, Hortaliças e Grãos**. [s. l.]: Editora Científica Digital, 2024. p. 68–81.

HARISH, S. *et al.* Biohardening with Plant Growth Promoting Rhizosphere and Endophytic bacteria induces systemic resistance against Banana bunchy top virus. **Applied Soil Ecology**, [s. l.], v. 39, n. 2, p. 187–200, jun. 2008.

HOFFMANN, Ricardo Bezerra *et al.* Acúmulo de matéria seca e de macronutrientes em cultivares de bananeira irrigada. **Revista Brasileira de Fruticultura**, [s. l.], v. 32, n. 1, p. 268–275, 26 fev. 2010.

HUNGRIA, Mariangela; NOGUEIRA, Marco Antonio; ARAUJO, Ricardo Silva. Co-inoculation of soybeans and common beans with rhizobia and azospirilla: strategies to improve sustainability. **Biology and Fertility of Soils**, [s. l.], v. 49, n. 7, p. 791–801, 12 out. 2013.

IBGE — INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

- IDRIS, ElSorra E. *et al.* Tryptophan-Dependent Production of Indole-3-Acetic Acid (IAA) Affects Level of Plant Growth Promotion by *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42. **Molecular Plant-Microbe Interactions**, [s. l.], v. 20, n. 6, p. 619–626, jun. 2007.
- KAMINSKY, Laura M. *et al.* The Inherent Conflicts in Developing Soil Microbial Inoculants. **Trends in Biotechnology**, [s. l.], v. 37, n. 2, p. 140–151, fev. 2019.
- KHALID, A.; ARSHAD, M.; ZAHIR, Z. A. Screening plant growth-promoting rhizobacteria for improving growth and yield of wheat. **Journal of Applied Microbiology**, [s. l.], v. 96, n. 3, p. 473–480, mar. 2004.
- KHAN, Naeem *et al.* Comparative Physiological and Metabolic Analysis Reveals a Complex Mechanism Involved in Drought Tolerance in Chickpea (*Cicer arietinum* L.) Induced by PGPR and PGRs. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 2097, 14 fev. 2019.
- KUMAR, Amit *et al.* An Introduction to Mechanistic Insights into Plant Growth Promoting Bacteria for Sustainable Agriculture. **International Journal of Modern Science and Research Technology**, [s. l.], v. 3, n. 12, 2025.
- KUMAR, P. Lava *et al.* Biology, Etiology, and Control of Virus Diseases of Banana and Plantain. In: LOEBENSTEIN, G.; CARR, J. P. (Ed.). **Advances in Virus Research**. [s. l.]: Academic Press, 2015. v. 91, p. 229–269.
- KUSS, Anelise Vicentini *et al.* Fixação de nitrogênio e produção de ácido indolacético in vitro por bactérias diazotróficas endofíticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 42, n. 10, p. 1459–1465, out. 2007.
- LACERDA, Julian Junio de Jesús *et al.* Adubação, produtividade e rentabilidade da rotação entre soja e milho em solo com fertilidade construída. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 50, n. 9, p. 769–778, set. 2015.
- LIMA, Francisca. **Qualidade do solo e produção da bananeira prata anã associada a plantas de cobertura e diferentes lâminas de irrigação**. 2016. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- LIU, Xiyang *et al.* Phosphorus solubilizing bacteria *Bacillus thuringiensis* and *Pantoea ananatis* simultaneously promote soil inorganic phosphate dissolution and soil Pb immobilization. **Rhizosphere**, [s. l.], v. 20, p. 100448, dez. 2021.
- LOPES, Cleomar. **Diferentes lâminas de irrigação no cultivo da bananeira Prata Anã em Missão Velha - CE**. 2018. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- MAIA, Ana Heloisa; SOUZA, Victória Santos; SOUZA, Manoel Euzébio. Produtividade de bananeira BRS Princesa consorciada com adubos verdes em Nova Xavantina, Mato Grosso, Brasil. **Brazilian Journal of Development**, [s. l.], v. 5, n. 12, p. 29772–29785, 2019.
- MARIN, Felix *et al.* From Microbial Dynamics to Functionality in the Rhizosphere: A Systematic Review of the Opportunities With Synthetic Microbial Communities. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 12, p. 650609, 3 jun. 2021.

MATOS, Amanda D. M. *et al.* Phosphate solubilization by endophytic bacteria isolated from banana trees. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [s. l.], v. 89, n. 4, p. 2945–2954, 4 set. 2017.

MEDEIROS, Silvia. **Efeito de filmes de quitosana e bentonita na conservação pós-colheita de banana prata (*Musa spp.*)**. 2020. Dissertação (Mestrado em Nutrição) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

MEENAKSHI *et al.* Mitigation of drought stress in wheat crop by drought tolerant endophytic bacterial isolates. **Vegetos**, [s. l.], v. 32, n. 4, p. 486–493, 11 dez. 2019.

MELO, D. M. *et al.* Resposta da bananeira cv. Princesa, em seu 1º ciclo de produção, à fertirrigação com aplicação de biofertilizantes e extratos vegetais. In: INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 3., 2015, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: INOVAGRI/INCT-EI, 2015.

MON, YinYin *et al.* Evaluation of Plant Growth Parameters by In vitro and Ex vitro Inoculation of Micropropagated Banana Plantlets with Rhizospheric and Endophytic Bacterial Inoculum. **Journal of Scientific and Innovative Research**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 16–22, 30 jan. 2021.

MORIKAWA, Masaaki; HIRATA, Yoshihiko; IMANAKA, Tadayuki. A study on the structure–function relationship of lipopeptide biosurfactants. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular and Cell Biology of Lipids**, [s. l.], v. 1488, n. 3, p. 211–218, nov. 2000.

NAUTIYAL, C. Shekhar. An efficient microbiological growth medium for screening phosphate solubilizing microorganisms. **FEMS Microbiology Letters**, [s. l.], v. 170, n. 1, p. 265–270, jan. 1999.

NEILANDS, J. B. Siderophores: Structure and Function of Microbial Iron Transport Compounds. **Journal of Biological Chemistry**, [s. l.], v. 270, n. 45, p. 26723–26726, nov. 1995.

OLEŃSKA, Ewa *et al.* Beneficial features of plant growth-promoting rhizobacteria for improving plant growth and health in challenging conditions: A methodical review. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 743, p. 140682, nov. 2020.

OLIVEIRA, Elisa Maria de *et al.* Isolation and Characterization of Biosurfactant-Producing Bacteria from Amapaense Amazon Soils. **International Journal of Microbiology**, [s. l.], v. 2021, p. 1–11, 16 ago. 2021.

OLIVEIRA, Elisa Maria de *et al.* Biosurfactant by *Serratia* sp. BR13816: Fermentation Optimization and Nanoemulsion Formation. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, [s. l.], v. 67, 2024.

OLIVEIRA, Elisa Maria. **Prospecção de bactérias do solo da Amazônia amapaense e otimização da produção de biossurfactante**. 2020. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2020.

OLIVEIRA, Romário. **Ocorrência, isolamento e caracterização de *Azospirillum* sp. em *Jacaratia corumbensis* O. Kuntze (Jaracatiá)**. 2019. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) — Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2019.

ORTEGA, Roddy *et al.* Biofertilización como suplemento en la nutrición del cultivo de banano (*Musa* AAA). **CORBANA**, [s. l.], v. 45, p. 51–66, 2019.

PATEL, P. R.; SHAIKH, S. S.; SAYYED, R. Z. Modified chrome azurol S method for detection and estimation of siderophores having affinity for metal ions other than iron. **Environmental Sustainability**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 81–87, 23 mar. 2018.

PEREIRA, Débora Francine Gomes Silva *et al.* Characterization and activity of endophytic bacteria from ‘Prata Anã’ banana crop (*Musa* sp., AAB). **Revista Ceres**, [s. l.], v. 65, n. 5, p. 381–387, set. 2018.

PEREIRA, Maysa Mathias Alves *et al.* Isolamento e identificação de microorganismos promotores de crescimento e inoculação em mudas de bananeira in vitro. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. e54010112080, 30 jan. 2021.

PETRILLO, Claudia *et al.* Plant Growth-Promoting Bacterial Consortia as a Strategy to Alleviate Drought Stress in *Spinacia oleracea*. **Microorganisms**, [s. l.], v. 10, n. 9, p. 1798, 6 set. 2022.

PINTO, José Maria *et al.* Doses de nitrogênio e potássio aplicadas via fertirrigação em bananeira. **Irriga**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 46–52, 28 mar. 2005.

PIROMYOU, Pongdet *et al.* Effect of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) inoculation on microbial community structure in rhizosphere of forage corn cultivated in Thailand. **European Journal of Soil Biology**, [s. l.], v. 47, n. 1, p. 44–54, jan. 2011.

POSADA, Luisa F. *et al.* Bioprospecting of aerobic endospore-forming bacteria with biotechnological potential for growth promotion of banana plants. **Scientia Horticulturae**, [s. l.], v. 212, p. 81–90, nov. 2016.

RAMOS, Polianna de Paula *et al.* Isolamento, caracterização de rizobactérias e análise da produção de ácido indolacético visando ao enraizamento de estacas de oliveira (*Olea europaea* L.). **Ciência Florestal**, [s. l.], v. 31, n. 4, p. 1612–1630, 17 nov. 2021.

ROCHA, Josiele S. *et al.* Endophytic interaction of *Bacillus* sp. in micropropagated banana plantlets. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [s. l.], v. 91, n. 3, 2019.

RODRIGUES, Ana J. O. *et al.* Gas exchange and leaf area of banana plants under salt stress inoculated with growth-promoting bacteria. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 25, n. 11, p. 779–786, nov. 2021.

RODRIGUES, Eder Paulo; RIBEIRO, Kátia Daniela; SILVA, Adriano Alves da. Reinoculação foliar de soja em área de sequeiro do centro-oeste de Minas Gerais. **Acta Biológica Catarinense**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 51–61, 5 abr. 2021.

RODRIGUES, Francisco. **Produção de Frutos e Exportação de Nutrientes Pela Bananeira em Função da Adubação com NPK**. 2011. Dissertação (Mestrado em Agronomia) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

RODRÍGUEZ, Hilda; FRAGA, Reynaldo. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. **Biotechnology Advances**, [s. l.], v. 17, n. 4–5, p. 319–339, out. 1999.

ROSLAN, Muhamad Aidilfitri Mohamad *et al.* Seed biopriming with P- and K-solubilizing *Enterobacter hormaechei* sp. improves the early vegetative growth and the P and K uptake of okra (*Abelmoschus esculentus*) seedling. **PLOS ONE**, [s. l.], v. 15, n. 7, p. e0232860, 9 jul. 2020.

SANTOS, Bruna Hanielle Carneiro dos *et al.* Controle de *Meloidogyne javanica* em mudas de bananeira “prata-anã” por compostos orgânicos. **Revista Brasileira de Fruticultura**, [s. l.], v. 35, n. 2, p. 650–656, jun. 2013.

SANTOS, Eder de Oliveira *et al.* Biomass accumulation and nutrition in micropropagated plants of the banana ‘Prata Catarina’ under biofertilisers. **Revista Caatinga**, [s. l.], v. 30, n. 4, p. 901–911, dez. 2017.

SANTOS, Gleyce. **Seleção de estirpes de *Azospirillum* spp. para promoção do desenvolvimento inicial de plântulas de milho**. 2024. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) — Universidade Federal de São João del-Rei, Sete Lagoas, 2024.

SARWAR, Sair *et al.* Screening of Siderophore-Producing PGPRs Isolated from Groundnut (*Arachis hypogaea* L.) Rhizosphere and Their Influence on Iron Release in Soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [s. l.], v. 51, n. 12, p. 1680–1692, 3 jul. 2020.

SATPUTE, Surekha K. *et al.* Methods for investigating biosurfactants and bioemulsifiers: a review. **Critical Reviews in Biotechnology**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 127–144, 9 jun. 2010.

SCHWYN, B.; NEILANDS, J. B. Universal chemical assay for the detection and determination of siderophores. **Analytical Biochemistry**, [s. l.], v. 160, n. 1, p. 47-56, jan. 1987.

SHARMA, Seema B. *et al.* Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. **SpringerPlus**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 587, 31 dez. 2013.

SHAYANTHAN, Ambihai; ORDOÑEZ, Patricia Ann C.; ORESNIK, Ivan John. The Role of Synthetic Microbial Communities (SynCom) in Sustainable Agriculture. **Frontiers in Agronomy**, [s. l.], v. 4, 30 jun. 2022.

SILVA, José Tadeu Alves da; SILVA, Inêz Pereira; PEREIRA, Rosimeire Dantas. Adubação fosfatada em mudas de bananeira ‘Prata anã’ (AAB), cultivadas em dois Latossolos. **Revista Ceres**, [s. l.], v. 58, n. 2, p. 238–242, abr. 2011.

SILVA FILHO, G. N.; VIDOR, C. Solubilização de fostatos por microrganismos na presença de fontes de carbono. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 24, n. 2, p. 311–319, jun. 2000.

SOCORRO, Jurema. **Aspectos agronômicos, fitopatológicos e socioeconômicos da sigatoka-negra na cultura da bananeira no Estado do Amapá**. Macapá: Embrapa Amapá, 2011.

SOUZA, Glacielen *et al.* Desenvolvimento de uma comunidade microbiana sintética resistente a multimetais. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA, 16.; CONGRESSO FLUMINENSE DE PÓS-GRADUAÇÃO, 9., 2024. **Anais...** [s. l.]: [s.n.], 2024.

SOUZA, Gleika Larisse Oliveira Dorasio de *et al.* Triple combinations with PGPB stimulate plant growth in micropropagated banana plantlets. **Applied Soil Ecology**, [s. l.], v. 103, p. 31–35, jul. 2016.

SOUZA, Gleika Larisse Oliveira Dorasio de *et al.* Endophytic bacteria used as bioinoculants in micropropagated banana seedlings. **Revista Brasileira de Fruticultura**, [s. l.], v. 39, n. 2, 2017.

SOUZA, Suzane A. *et al.* Endophytic bacterial diversity in banana “Prata Anã” (*Musa spp.*) roots. **Genetics and Molecular Biology**, [s. l.], v. 36, n. 2, p. 252–264, 2013.

SPAEPEN, Stijn; VANDERLEYDEN, Jos; REMANS, Roseline. Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism-plant signaling. **FEMS Microbiology Reviews**, [s. l.], v. 31, n. 4, p. 425–448, jul. 2007.

TEIXEIRA, Luiz Antonio Junqueira; NATALE, William; RUGGIERO, Carlos. Alterações em alguns atributos químicos do solo decorrentes da irrigação e adubação nitrogenada e potássica em bananeira após dois ciclos de cultivo. **Revista Brasileira de Fruticultura**, [s. l.], v. 23, n. 3, p. 684–689, dez. 2001.

TIMOFEEVA, Anna M.; GALYAMOVA, Maria R.; SEDYKH, Sergey E. Plant Growth-Promoting Bacteria of Soil: Designing of Consortia Beneficial for Crop Production. **Microorganisms**, [s. l.], v. 11, n. 12, p. 2864, 26 nov. 2023.

UZOIGWE, Chibuzo *et al.* Bioemulsifiers are not biosurfactants and require different screening approaches. **Frontiers in Microbiology**, [s. l.], v. 6, 7 abr. 2015.

VALDEZ-NUÑEZ, Renzo A. *et al.* Caracterización genética de bacterias endofíticas de arroz (*Oryza sativa* L.) con actividad antimicrobiana contra *Burkholderia glumae*. **Revista Argentina de Microbiología**, [s. l.], v. 52, n. 4, p. 315–327, out. 2020.

VESSEY, J. Kevin. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. **Plant and Soil**, [s. l.], v. 255, n. 2, p. 571–586, ago. 2003.

VORHOLT, Julia A. *et al.* Establishing Causality: Opportunities of Synthetic Communities for Plant Microbiome Research. **Cell Host & Microbe**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 142–155, ago. 2017.

WALLENSTEIN, Matthew D. Managing and manipulating the rhizosphere microbiome for plant health: A systems approach. **Rhizosphere**, [s. l.], v. 3, p. 230–232, jun. 2017.

WEBER, O. B. *et al.* Isolation and characterization of diazotrophic bacteria in banana and pineapple plants. **Plant and Soil**, [s. l.], v. 210, p. 103–113, 1999.

WEBER, Olmar B. *et al.* *Herbaspirillum*-like bacteria in banana plants. **Brazilian Journal of Microbiology**, [s. l.], v. 32, n. 3, p. 201–205, out. 2001.

WEBER, Olmar Baller; BALDANI, José Ivo; DÖBEREINER, Johanna. Bactérias diazotróficas em mudas de bananeira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 35, n. 11, p. 2227–2285, nov. 2000.

YOUSSEF, Noha H. *et al.* Comparison of methods to detect biosurfactant production by diverse microorganisms. **Journal of Microbiological Methods**, [s. l.], v. 56, n. 3, p. 339–347, mar. 2004.

ZHANG, Zhengcheng *et al.* Active Nitrogen Fixation by Iron-Reducing Bacteria in Rice Paddy Soil and Its Further Enhancement by Iron Application. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 13, n. 14, p. 8156, 13 jul. 2023.