

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

**RESPOSTA DE *AGAVE SISALANA* INOCULADA COM
BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO**

ELISÂNGELA GONÇALVES PEREIRA

CRUZ DAS ALMAS - BAHIA

JULHO - 2025

RESPOSTA DE *AGAVE SISALANA* INOCULADA COM BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO

Elisângela Gonçalves Pereira
Tecnóloga em Agroecologia, UFRB, 2015

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

Orientadora: Profa. Dra. Simone Alves Silva

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

FICHA CATALOGRÁFICA

P436r

Pereira, Elisângela Gonçalves.

Resposta de *Agave sisalana* inoculadas com bactérias promotoras de crescimento / Elisângela Gonçalves Pereira. – Cruz das Almas, BA, 2025.

145f.: il.

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

Orientadora: Prof. Dra. Simone Alves da Silva.

1.Sisal – Propagação in vitro. 2.Sisal – Regulador de crescimento. 3.Análise – Regiões Áridas (BA). I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias Ambientais e Biológicas. II.Título.

CDD: 633.59

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

**RESPOSTA DE AGAVE SISALANA INOCULADA COM
BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO**

Comissão Examinadora da Defesa de
Tese de Elisângela Gonçalves Pereira
Aprovada em 15 de Julho de 2025

Documento assinado digitalmente



SIMONE ALVES SILVA

Data: 26/09/2025 17:09:21-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Simone Alves da Silva
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB
Orientador

Documento assinado digitalmente



CARLOS ALBERTO DA SILVA LEDO

Data: 26/09/2025 22:19:24-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Carlos Alberto da Silva Ledo
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB
Examinador Interno

Documento assinado digitalmente



LEILANE SILVEIRA D'ÁVILA

Data: 26/09/2025 17:37:48-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Leilane Silveira D'Ávila
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB
Examinadora Interna

Documento assinado digitalmente



TAMYRES AMORIM REBOUCAS

Data: 26/09/2025 18:15:07-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Tamyres Amorim Rebouças
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA
Examinadora Externa

Documento assinado digitalmente



FERNANDA DOS SANTOS NASCIMENTO

Data: 26/09/2025 19:11:57-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Fernanda dos Santos Nascimento
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia- UFRB
Examinadora Interna

Mas aqueles que contam com o Senhor
renovam suas forças;
ele dá-lhes asas de águia, correm sem se
cansar, vão para a frente sem se fatigar.

(Isaías 40: 31)

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus queridos pais e familiares, que sempre me apoiaram, incentivaram e acreditaram no meu potencial. Ao meu esposo pelo apoio incondicional. Sem o amor, a força e o apoio de vocês, essa conquista não teria sido possível. Também dedico a Deus, fonte de toda força, sabedoria e esperança, por me guiar e iluminar o caminho nesta jornada.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por todas as bênçãos que tem me concedido. Obrigada Deus por ter me dado sabedoria, paciência por sempre me encorajar durante esse tempo, por me sustentar nos momentos difíceis.

Agradeço a minha orientadora Prof^a Dra. Simone Alves Silva, pela orientação.

À Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), ao programa de pós graduação em Ciências Agrárias, ao laboratório de Biologia do solo e o de Microbiologia Agrícola por fornecer a estrutura para a realização deste trabalho.

À CAPES, pela bolsa concedida até o final do curso.

Aos meus pais pelos ensinamentos, valor a família e por torcerem pela minha vitória.

Um agradecimento especial ao meu esposo, Lazaro e aos meu filhos Davi Lucas e Maria Júlia pelo carinho e incentivo durante toda a caminhada, mas principalmente pela paciência, apoio e compreensão das ausências e nos momentos de dificuldade.

A minha irmã Ana Lúcia juntamente com meu cunhado Cláudio, que também contribuíram ajudando sempre que precisei.

A minha família, que sempre esteve presente, em especial aos meus irmãos Ana Paula, Alexsandro, Anatalia e Anatanael.

As técnicas do laboratório de Microbiologia Agrícola Lene e Verônica.

Aos funcionários da Fazenda Experimental, Luiz Antônio, Everaldo, Eivaldo Rosinha e Renato por todo auxílio durante o desenvolvimento do trabalho.

À minha turma do doutorado em Ciências Agrárias, principalmente as mulheres das Agrárias, Yasmin, Jaqueline e Jamile, as quais dividimos diariamente as aflições, nervosismos e alegrias.

Aos amigos de sempre, que mesmo longe se mantiveram presente na minha rotina diária: Djalma, Ésio, Andreza, Cheila e Caliane.

A todos que não foram mencionados, mas que contribuíram de maneira direta ou indireta para a realização deste trabalho e para o meu crescimento pessoal e profissional.

Muito Obrigada!

RESPOSTA DE *AGAVE SISALANA* INOCULADA COM BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO

RESUMO GERAL

Agave sisalana é uma cultura de grande importância social e econômica para o Semi-Árido Brasileiro, especialmente para os agricultores familiares. Muitos estudos têm demonstrado que a inoculação com bactérias diazotróficas possuem elevado potencial na promoção do crescimento e da nutrição vegetal, além de se apresentar como tecnologia ecologicamente correta na melhoria da produção agrícola, é uma tecnologia de baixo custo e atuam como biofertilizantes e/ou bioestimulantes. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da inoculação com bactérias diazotróficas nos parâmetros de crescimento, nos níveis de nutrientes e na mitigação ao estresse hídrico em mudas de *Agave sisalana* Perrine micropropagadas *in vitro*. Os resultados mostraram que as bactérias promotoras de crescimento são uma boa alternativa aos fertilizantes convencionais devido à relação custo-benefício, ecologia e sustentabilidade para aumentar a tolerância das plantas a vários estresses, incluindo a seca, tais microorganismos podem induzir a resistência das plantas a seca e uma variedade de estresses abióticos, particularmente aqueles que se assemelham a ambientes de campo. A inoculação com bactérias promotoras de crescimento, especialmente *Azospirillum brasilense* (Ab-V5) e UFRB FA34C2-2, eleva clorofilas, nutrição nitrogenada e biomassa de *Agave sisalana*, igualando ou superando a adubação nitrogenada mineral a depender da variável e do tipo de muda. O uso de rebentos micropropagados, associados ao isolados UFRB F234C22 e a dose de 180 Kg ha⁻¹ de nitrogênio, mostrou desempenho consistente em diversas variáveis, configurando-se como uma alternativa viável para aumentar a resiliência das culturas frente à variabilidade climática.

Palavras-chave: Bactérias promotoras de crescimento de planta, Inoculação, Micropropagação, Nutrição vegetal, Restrição hídrica, Sisal.

RESPONSE OF AGAVE SISALANA INOCULATED WITH GROWTH-PROMOTING BACTERIA

GENERAL ABSTRACT

Agave sisalana is a crop of great social and economic importance for the Brazilian semi-arid region, especially for family farmers. Many studies have shown that inoculation with diazotrophic bacteria has high potential for promoting plant growth and nutrition. It is also an environmentally friendly technology for improving agricultural production. It is low-cost and acts as a biofertilizer and/or biostimulant. Therefore, the objective of this study was to evaluate the effect of inoculation with diazotrophic bacteria on growth parameters, nutrient levels, and water stress mitigation in Agave sisalana Perrine seedlings micropropagated in vitro. The results showed that growth-promoting bacteria are a good alternative to conventional fertilizers due to their cost-effectiveness, ecological, and sustainability, and increase plant tolerance to various stresses, including drought. These microorganisms can induce plant resistance to drought and a variety of abiotic stresses, particularly those that resemble field environments. Inoculation with growth-promoting bacteria, especially Azospirillum brasilense (Ab-V5) and UFRB FA34C2-2, increases chlorophyll, nitrogen nutrition, and biomass of Agave sisalana, equaling or surpassing mineral nitrogen fertilization, depending on the variable and seedling type. The use of micropropagated shoots, associated with the UFRB F234C22 isolate and a nitrogen dose of 180 kg ha⁻¹, showed consistent performance across several variables, constituting a viable alternative for increasing crop resilience to climate variability.

Keywords: Sisal, Biological nitrogen fixation, Plant growth promotion, Acclimatization of, micropropagated, plants, Vegetable, nutrition.

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1 - Questões levantadas sobre o uso e potencial de bactérias promotoras de crescimento vegetal como biocondicionadores do estresse hídrico em regiões semiárida.....22

Tabela 2 - Termos PICOS para a “questão” de pesquisa utilizada em uma revisão sistemática sobre o uso e potencial de bactérias promotoras de crescimento vegetal como biocondicionadores do estresse hídrico em regiões semiáridas nos últimos 10 anos.....23

Tabela 3 - Palavras-chave de busca utilizadas para a revisão sistemática sobre o uso e potencial de bactérias promotoras de crescimento vegetal como biocondicionadores do estresse hídrico em regiões semiáridas nos últimos 10 anos.....24

Tabela 4 - Bactérias de regiões secas relacionadas em artigos sobre promoção de crescimento de plantas e tolerância ao estresse hídrico...32

CAPÍTULO 2

Tabela 1 - Resumo da ANAVA de variáveis de plantas de *Agave salinas* sob efeito do tipo de muda e tratamentos.....64

Tabela 2 - Valores médios para altura da parte área (H) de mudas de *Agave sisalana*.....65

Tabela 3 - Valores médios para área foliar (AF) de mudas de *Agave sisalana*..68

Tabela 4 - Valores médios para diâmetro do pseudocaulo (DP) de mudas de *Agave sisalana*.....53

Tabela 5 - Valores médios para massa seca da parte área (MSPA) de mudas de *Agave sisalana*.....56

Tabela 6 - Valores médios para massa seca da raiz (MSR) de mudas de *Agave sisalana*.....75

Tabela 7- Valores médios para massa seca total (MST) de mudas de *Agave sisalana*.....77

Tabela 8 - Valores médios para clorofila a (CLA) de mudas de <i>Agave sisalana</i>	79
Tabela 9 - Valores médios para clorofila b (CLB) de mudas de <i>Agave sisalana</i>	81
Tabela 10 - Valores médios para clorofila total (CLT) de mudas de <i>Agave sisalana</i>	84
Tabela 11 - Valores médios para teor de N (N) de mudas de <i>Agave sisalana</i>	86
Tabela 12 - Valores médios para teor de fósforo (P) de mudas de <i>Agave sisalana</i>	88
Tabela 14 - Caracterização química do composto orgânico preparado a partir de esterco bovino e caprino e podas de árvores.	98

CAPÍTULO 3

Tabela 1 - Resumo da anava	109
---	-----

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1 - Diagrama de fluxo PRISMA de estudos incluídos na revisão sistemática sobre o uso e potencial de bactérias promotoras de crescimento vegetal como biocondicionadores do estresse hídrico em regiões semiáridas nos últimos 10 anos.....25

Figura 2 - Mapa bibliométrico de palavras-chave dos artigos aceitos sobre o uso e potencial de bactérias promotoras de crescimento vegetal como biocondicionadores do estresse hídrico em regiões semiáridas nos últimos 10 anos.....26

Figura 3 - Frequência de revistas que mais publicaram sobre o uso e potencial de bactérias promotoras de crescimento vegetal em estresse hídrico nos últimos 10 anos.....27

Figura 4 - Locais dos estudos incluídos nesta revisão sistemática relatando os países que mais realizaram estudos sobre bactérias promotoras de crescimento vegetal de regiões semiáridas como biocondicionadoras do estresse hídrico. Os círculos com coloração variando do amarelo ao vermelho indicam a abundância de espécies ou gêneros de bactérias em cada país.....29

Figura 5 - Frequência de gêneros de bactérias em publicações sobre o uso e potencial de bactérias promotoras de crescimento vegetal como biocondicionadoras do estresse hídrico nos últimos 10 anos.....30

Figura 6 - Frequência de espécies vegetais onde foram aplicadas bactérias promotoras de crescimento vegetal como biocondicionadoras do estresse hídrico nos últimos 10 anos.....39

CAPÍTULO 2

Figura 1 - Locais de amostragem e mapa da área de cultivo do sisal na Bahia. No mapa principal da esquerda para direita está a cidade de Conceição do Coité que faz parte do território do Sisal.....59

Figura 2 - Amostragem do local onde foram retiradas plantas de sisal para micropropagação in vitro. (A) mudas oriundas do rebento. (B) mudas oriundas do bulbilho. (C) Mudas micropropagadas em casa de vegetação.....60

Figura 3 - Box-plot para altura (H) de mudas de *Agave sisalana*.....62

Figura 4 - Box-plot para área foliar (AF) de mudas de *Agave sisalana*.....67

Figura 5 - Box-plot para teor de diâmetro do pseudocaule (DP) de mudas de *Agave sisalana*.....69

Figura 6 - Box-plot para massa seca da parte área (MSPA) de mudas de *Agave sisalana*.....72

Figura 7 - Box-plot para massa seca da raiz (MSR) de mudas de *Agave sisalana*.....74

Figura 8 - Box-plot para massa seca total (MST) de mudas de *Agave sisalana*.....76

Figura 9 - Box-plot para clorofila a (CLA) de mudas de *Agave sisalana*.....78

Figura 10 - Box-plot para clorofila b (CLB) de mudas de *Agave sisalana*.....80

Figura 11 - Box-plot para clorofila total (CLT) de mudas de *Agave sisalana*. 83

Figura 12 - Box-plot para o teor de N (N) de mudas de *Agave sisalana*...85

Figura 13 - Box-plot para teor de fósforo (P) de mudas de *Agave sisalana*.....87

CAPÍTULO 3

Figura 1 - Valores médios de NF para cada combinação de bactéria, tipo de muda e condição hídrica. Medias de bactérias, para cada combinação de tipos de muda e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade. Medias de tipos de mudas, para cada combinação de bactérias e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade.....110

Figura 2 - Valores médios de H para cada combinação de bactéria, tipo de muda e condição hídrica. Medias de bactérias, para cada combinação de tipos de muda e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade. Medias de tipos de mudas, para cada combinação de bactérias e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade.....111

Figura 3 - Valores médios de LF para cada combinação de bactéria, tipo de muda e condição hídrica. Medias de bactérias, para cada combinação de tipos de muda e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade. Medias de tipos de mudas, para cada combinação de bactérias e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade..... 111

Figura 4 - Valores médios de MSPA para cada combinação de bactéria, tipo de muda e condição hídrica. Medias de bactérias, para cada combinação de tipos de muda e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade. Medias de tipos de mudas, para cada combinação de bactérias e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade.....113

Figura 5 - Valores médios de MSR para cada combinação de bactéria, tipo de muda e condição hídrica. Medias de bactérias, para cada combinação de tipos de muda e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade. Medias de tipos de mudas, para cada combinação de bactérias e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade.....113

Figura 6 - Valores médios de MST para cada combinação de bactéria, tipo de muda e condição hídrica. Medias de bactérias, para cada combinação de tipos de muda e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade. Medias de tipos de mudas, para cada combinação de bactérias e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade 114

Figura 7 - Valores médios de VR para cada combinação de bactéria, tipo de muda e condição hídrica. Medias de bactérias, para cada combinação de tipos de muda e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade. Medias de tipos de mudas, para cada combinação de bactérias e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade..... 115

Figura 8 - Valores médios de CR para cada combinação de bactéria, tipo de muda e condição hídrica. Medias de bactérias, para cada combinação de tipos de muda e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade. Medias de tipos de mudas, para cada combinação de

bactérias e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade..... 117

Figura 9 - Valores médios de AF para cada combinação de bactéria, tipo de muda e condição hídrica. Medias de bactérias, para cada combinação de tipos de muda e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade. Medias de tipos de mudas, para cada combinação de bactérias e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade..... 119

Figura 10 - Valores médios de TAL para cada combinação de bactéria, tipo de muda e condição hídrica. Medias de bactérias, para cada combinação de tipos de muda e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade. Medias de tipos de mudas, para cada combinação de bactérias e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade 119

Figura 11 - Valores médios de RAF para cada combinação de bactéria, tipo de muda e condição hídrica. Medias de bactérias, para cada combinação de tipos de muda e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade. Medias de tipos de mudas, para cada combinação de bactérias e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade 119

Figura 12 - Valores médios de RMR para cada combinação de bactéria, tipo de muda e condição hídrica. Medias de bactérias, para cada combinação de tipos de muda e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade. Medias de tipos de mudas, para cada combinação de bactérias e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade 119

Figura 13 - Valores médios de ICF_a para cada combinação de bactéria, tipo de muda e condição hídrica. Medias de bactérias, para cada combinação de tipos de muda e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade. Medias de tipos de mudas, para cada combinação de bactérias e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade 120

Figura 14 - Valores médios de ICF_b para cada combinação de bactéria,

tipo de muda e condição hídrica. Medias de bactérias, para cada combinação de tipos de muda e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade. Medias de tipos de mudas, para cada combinação de bactérias e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade.....120

SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO GERAL.....	18
2.0 REVISÃO DE LITERATURA.....	20
2.1 Aspectos gerais da cultura do sisal.....	
2.2 Importância econômica do sisal.....	22
2.3 Bactérias promotoras de crescimento vegetal e seu potencial para amenizar estresse hídrico em condições semiáridas.....	23
2.4 Utilização das Bactérias Endofíticas na Agricultura	26
2.5 Bactérias promotoras de crescimento vegetal e seu potencial para amenizar estresses hídrico em condições semiáridas.....	27
3. REFERÊNCIAS.....	31
CAPÍTULO 1 - Uso e potencial de bactérias promotoras de crescimento vegetal provenientes de regiões semiáridas como biocondicionadores do estresse hídrico: Uma revisão sistemática.....	36
RESUMO.....	37
ABSTRACT.....	38
1.0 INTRODUÇÃO.....	39
2.0 MATERIAL E MÉTODOS.....	41
2.1 Planejamento.....	42
2.2 Execução.....	42
2.3 Sumarização.....	44
3.0 RESULTADOS.....	45
3.1 Pesquisa em bancos de dados.....	45
3.2 Análises bibliométricas	47
3.3 Bactérias associadas à estresse hídrico em regiões semiáridas.....	48
3.4 Aplicações de bactérias provenientes de regiões semiáridas.....	48
4.0 DISCUSSÃO.....	49
4.1 Pesquisa em bancos de dados.....	49
4.2 Bactérias associadas à estresse hídrico em regiões semiáridas.....	50
4.3 Aplicações de bactérias provenientes de regiões semiáridas.....	51
5.0 Considerações finais e perspectivas futuras.....	52
6.0 REFERÊNCIAS.....	53
CAPÍTULO 2- Bactérias promotoras de crescimento como bioestimulantes na nutrição de mudas de <i>Agave sisalana</i> micropropagadas <i>in vitro</i>.....	62
RESUMO.....	63
ABSTRACT.....	64
1.0 INTRODUÇÃO.....	65
2.0 MATERIAL E MÉTODOS.....	68
2.1 Desenho experimental e estirpes de bactérias diazotróficas.....	69
2.2 Material vegetal e estabelecimento <i>in vitro</i>	70
2.3 Preparo do substrato e inoculação das plântulas.....	71
2.4 Condução do experimento e análises de crescimento.....	71
2.5 Análise nutrição foliar.....	72
2.6 Análise Estatística.....	73
3.0 RESULTADOS.....	73

3.0 RESULTADOS.....	75
4.0 DISCUSSÃO.....	80
5.0 REFERÊNCIAS.....	85
CAPÍTULO 3- Bactérias promotoras de crescimento e doses de nitrogênio induzem o crescimento de mudas micropropagadas de <i>Agave Sisalana</i> sob restrição hídrica	89
RESUMO.....	100
ABSTRACT.....	101
1.0 INTRODUÇÃO.....	102
2.0 MATERIAL E MÉTODOS.....	105
2.1 Arranjo experimental e condições de cultivo.....	105
2.2 Características morfofisiológicas.....	107
2.3 Análise de Correspondência.....	107
3.0 RESULTADOS e DISCUSSÃO.....	108
4.0 CONCLUSÃO	120
5.0 REFERÊNCIAS.....	121

1.0 INTRODUÇÃO GERAL

Presentes no planeta desde os primórdios, os microorganismos são a forma de vida mais antiga, diversa e em maior quantidade existente na Terra, ocupando diferentes ecossistemas (CHANAL et al., 2006; KAYMAK et al., 2010; GAMALERO et al., 2022). No entanto, a compreensão das suas funcionalidades sobre os processos ecológicos ainda é escassa (ANTUNES et al., 2016). Uma dessas funções exercidas pelos microorganismos, que tem estado sobre a luz da ciência nos últimos tempos, está relacionada a importância da atividade microbiana para um melhor sucesso no desenvolvimento vegetal (LIM et al., 2013; ADMASSIE et al., 2022). Principalmente, para aquelas vegetações que sofrem alguma forma de estresses biótico ou abiótico como em ambientes semiáridos, onde a falta de água tem grande ocorrência (ETESAMI & BEATTIE, 2017; MEENA et al., 2017; PARRAY et al., 2016).

Nesses locais de clima semiárido, a água é um dos fatores limitantes para o desenvolvimento das plantas, assim como para todas as outras formas de vida. Na região nordeste do Brasil, o clima é variável desde o superúmido até o semiárido, no qual as chuvas ficam restritas a poucos meses do ano (SILVA, 2006). O semiárido nordestino abrange aproximadamente 60% do território da região e é caracterizado por uma distribuição irregular e concentrada das precipitações, com médias anuais que variam entre 300 e 800 mm, além de elevadas taxas de evaporação e longos períodos de estiagem (IPEA, 2015; MEDEIROS et al., 2018).

A vegetação predominante nesse bioma é a caatinga, adaptada a essas condições de seca prolongada, com espécies que apresentam mecanismos fisiológicos e morfológicos para conservar água. No entanto, apesar dessas adaptações, o estresse hídrico afeta significativamente o rendimento vegetal, comprometendo a produtividade agrícola e a segurança alimentar das populações locais (KAVAMURA et al., 2013; SOUSSI et al., 2015). Além dos desafios ambientais, fatores socioeconômicos como o acesso limitado à tecnologia, à irrigação agravam a vulnerabilidade das comunidades rurais frente às mudanças climáticas e à variabilidade interanual das chuvas (LIMA et al., 2020).

A cultura do sisal possui profunda relevância social e econômica para o

semiárido brasileiro, especialmente no estado da Bahia, onde se concentra cerca de 93% da produção nacional, distribuída principalmente nas regiões do Território do Sisal, Piemonte da Diamantina e Chapada Diamantina (VUORINNE et al., 2021). Essa atividade representa uma das principais fontes de renda e emprego para milhares de famílias rurais em áreas marcadas por baixos índices de desenvolvimento socioeconômico e elevada vulnerabilidade climática. No entanto, nas últimas duas décadas, a produção de sisal tem sofrido um declínio significativo, reflexo direto da ausência de políticas públicas voltadas à modernização do cultivo, da escassez de investimentos em pesquisa e desenvolvimento tecnológico e da ineficiência no manejo de recursos naturais, como solo e água.

A escassez hídrica crônica do semiárido, aliada à falta de sistemas produtivos adaptados às condições locais, compromete o rendimento da cultura e expõe a fragilidade de práticas agrícolas ainda rudimentares. Além disso, a ausência de programas de melhoramento genético e de produção de mudas com qualidade fitossanitária e nutricional agrava a incidência de doenças, como a podridão vermelha, causada por *Aspergillus welwitschiae*, considerada o principal problema fitossanitário da cultura no Brasil (DUARTE et al., 2018).

Também pesam sobre o setor dificuldades relacionadas à comercialização da fibra e à inexistência de cultivares mais produtivas e resilientes ao estresse abiótico (CARNEIRO et al., 2014; SOARES et al., 2020). Nesse contexto, a estagnação tecnológica e a falta de investimentos estruturantes vêm comprometendo não apenas a produtividade, mas também a sustentabilidade da cadeia produtiva do sisal, com impactos diretos na segurança econômica das comunidades dependentes dessa cultura.

Estudos que busquem elucidar as diversas interações entre planta e microrganismos vem se intensificando nos últimos anos com o intuito de entender os vários fatores envolvidos para a seleção de estirpes de bactérias eficientes na promoção de crescimento das grandes culturas (FERREIRA et al., 2014). Essa interação entre plantas e diferentes micro-organismos é uma estratégia natural para enfrentar estresses bióticos e abióticos principalmente em ambiente com limitações na produção vegetal (TRABELSI e MHAMDI, 2013).

Pesquisas têm evidenciado o potencial do uso de bactérias promotoras de crescimento vegetal em diversas culturas de interesse agrícola para região semiárida do Brasil (MARINHO et al., 2017; SANTOS et al., 2017; RODRIGUES et

al., 2018; SENA et al., 2020).

A Rizosfera é a região do solo que sofre intensa influência das raízes em que habitam diversos tipos de microorganismos. Dentre estes microorganismos, as bactérias promotoras de crescimento vegetal que colonizam a rizosfera e podem promover o crescimento das plantas. As bactérias epifíticas, que habitam a superfície vegetal, e as bactérias endofíticas, que habitam o interior dos tecidos vegetais, podem promover o crescimento da planta hospedeira, conforme já descrito para diversas culturas, como sisal (SOUZA et al., 2021), feijão (SENA et al., 2020), cana-de-açúcar (RODRIGUES et al., 2016) e abacaxi (BALDOTTO et al., 2010).

Os mecanismos pelos quais as bactérias promotoras de crescimento vegetal estimulam o crescimento das plantas envolve a solubilização de fosfato; produção de sideróforos (quelantes de ferro); produção de hormônios reguladores do crescimento vegetal (giberelina, auxina, etileno e citocina); e indiretamente através do antagonismo a organismos fitopatogênicos como fungos, vírus e indução da resistência sistêmica contra doenças (ARRUDA et al., 2013; LIU et al., 2013; SOUZA et al., 2012).

As bactérias têm a capacidade de produzir e secretar hormônios vegetais estimular o crescimento da planta, atuando na defesa do hospedeiro contra microrganismos patogênicos (SCHMIDT et al., 2011). Além de serem capazes de aumentar o rendimento das culturas, reduzir infecções por patógenos bem como reduzir estresses bióticos e abióticos sem prejudicar a planta, esses organismos podem promover a divisão celular e a extensão das raízes (OLIVEIRA et al., 2009) inclusive das raízes laterais e, em alguns casos, aumentar a biomassa de raiz e folha (SANTOS et al., 2017).

Perante a atual necessidade por novas tecnologias que visem diminuir os impactos negativos da agricultura tradicional, os micro-organismos associados à promoção de crescimento vegetal, demonstram ser uma excelente alternativa para a agricultura de maneira sustentável. A aplicação de bactérias promotoras de crescimento vegetal e fixadoras de nitrogênio é uma alternativa tecnológica que visa atender a essas necessidades melhorando a fertilidade do solo e reduzindo os impactos causados por estresse abióticos.

Os estudos relacionados as interações dos microorganismos e a diversidade desses associados as plantas ainda são poucos, principalmente em regiões

semiáridas (BABALOLA, 2010). No entanto, existe uma grande possibilidade de se encontrar microrganismos que apresentem potencial biotecnológico nunca antes estudado (RYAN et al., 2007; LIRA-CADETE et al., (2011); PARRAY et al., 2016; SILVI et al., 2013). Nas últimas décadas, bactérias que incluem espécies de *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Bacillus*, *Klebsiella*, *Enterobacter* e *Bulkholderia* têm sido reportadas por promover o crescimento de plantas (BPCP) (GLICK, 2015; KLOPPER et al., 1991; OKON; LABANDERA-GONZALES, 1994). Pesquisas têm demonstrado que diversas culturas vegetais apresentam potencial de ser colonizadas por bactérias (CABALLERO-MELLADO et al., 2004; GYANESHWAR et al., 2001; SALA et al., 2008; MEDEIROS et al., 2006; LUNA et al., 2010).

Santana et al. (2020) avaliaram a inoculação de bactérias promotoras de crescimento de plantas no sorgo em condições de seca e concluíram que o crescimento da planta e a nutrição de nitrogênio tiveram prejuízos devido à essa condição, porém, a inoculação de diferentes bactérias foi capaz de reduzir alguns efeitos negativos da escassez de água. Os autores notaram que houve um aumento no acúmulo de nitrogênio na parte aérea ocasionado por todas as cepas, demonstrando que elas apresentam uma capacidade diazotrófica mesmo sob estresse hídrico. A inoculação de *Bacillus* sp. ESA 402 foi a que demonstrou potencial para futuros testes de campo.

Costa e Melo (2012), isolando e determinando a diversidade de bactérias endofíticas em palma forrageira (*Opuntia ficus-indica*), observaram que 14 isolados produziram AIA variando entre 3,5 e 17,45 $\mu\text{g}\cdot\text{ml}^{-1}$, sendo esses, portanto, capazes de promover o crescimento vegetal em condições de seca. Niu et al. (2018) isolaram cepas bacterianas de raízes de painço (*Setaria italica* L.), uma cultura tolerante à seca cultivada em regiões semiáridas do Nordeste da China. Eles selecionaram quatro isolados por sua capacidade de produzir ACC desaminase, bem como a tolerância à seca. Com seu estudo os autores concluíram que as raízes de painço estão associadas uma variedade de rizobactérias que expressam alta tolerância ao estresse hídrico, favorecendo o crescimento vegetal e atuando diretamente na proteção das plantas sob essas condições ambientais.

Santos et al. (2014) realizaram ensaio com girassol avaliando o crescimento vegetal em função da inoculação de sementes com bactérias endofíticas e concluíram que não houve aumento no crescimento da planta. Quanto à tolerância ao déficit hídrico, com a microbiolização de *Bacillus* sp. e *E. cloacae*, os autores

observaram que em condições normais de umidade do solo, a combinação destas bactérias endofíticas proporcionou um aumento do crescimento do girassol, além de, aumentar a capacidade das plantas sob estresse hídrico de realizarem o ajustamento osmótico, pelo maior acúmulo de solutos orgânicos compatíveis.

Diante disso, para avaliar o potencial de bactérias diazotróficas na promoção de crescimento de *Agave Sisalana*, este trabalho teve como objetivos: 1 - Apresentar uma revisão sistemática sobre o uso e potencial de bactérias promotoras de crescimento vegetal de regiões semiáridas como biocondicionadores do estresse hídrico a partir de estudos realizados nos últimos 10 anos; 2 - Avaliar bactérias diazotróficas com efeito de promoção de crescimento comprovado na cultura do milho, na promoção do crescimento e nutrição de mudas de sisal produzidas *in vitro* e oriundas de diferentes explante e 3 – O efeito de bactérias promotoras de crescimento tipos de propágulos e doses de nitrogênio mineral no crescimento de mudas micropropagadas de *Agave sisalana* sob restrição hídrica.

2.0 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Aspectos gerais da cultura do sisal

O sisal (*Agave sisalana*) é uma planta herbácea, originária das regiões áridas e semiáridas da península de Yucatán no México, pertencente à classe das monocotiledôneas, família *Asparagaceae*, subfamília *Agavoideae* e gênero *Agave* (GARCÍA-MENDOZA, 2002; COLEMAN-DERR et al., 2016). O seu cultivo se destaca principalmente pela extração das fibras de suas folhas, que são as principais fibras duras comercializadas no mundo (MOREIRA et al., 1999; TEWARi et al., 2014).

Historicamente, o sisal foi introduzido no Sul da Flórida (EUA) entre os anos de 1834 e 1836 pelo cônsul norte-americano Dr. Henry Perrine (Medina, 1954), e posteriormente levado para a África e o Brasil (MOREIRA et al., 1999). No Brasil, a introdução do sisal ocorreu primeiramente na Bahia, mais especificamente no Recôncavo, no município de Maragogipe, em 1903 pelo industrial Horácio Uripia Júnior que adquiriu os primeiros bulbilhos de *Agave sisalana* de uma empresa norte-americana e passou a explorá-los em sua fazenda (MEDINA, 1954).

Em 1906, o sisal foi introduzido no estado de São Paulo, pelo Instituto Agrônomo de Campinas, com plantas trazidas da França pelo Dr. Gustavo D'Ultra (MEDINA, 1954). Contudo, a expansão da cultura do sisal na Bahia para comercialização da fibra só ocorreu nos anos de 1930 e 1940, pelo incentivo da Secretaria de Agricultura, devido à importância econômica da fibra nas épocas da Segunda Guerra Mundial e pós-guerra (MEDINA, 1954).

Assim como outras espécies de *Agave*, o sisal possui características morfofisiológicas que o tornam bem adaptado as regiões áridas e semiáridas do mundo, possuindo alta capacidade de suportar condições ambientais adversas devido ao seu potencial de conservar água em suas folhas (STEWART et al., 2015; SHAHZAD et al., 2022). Sua capacidade de retenção de água relaciona-se com a presença do metabolismo fotossintético do tipo CAM (Metabolismo Ácido Crussuláceo), que permite a abertura dos estômatos à noite, devido à menor evapotranspiração, apresentando eficiência transpiratória com menor consumo de água para produzir fitomassa (CORBIN et al., 2015; ABRAHAM et al., 2016).

Plantas como o sisal, são notáveis na eficiência do uso da água, utilizando apenas 50 a 100g de água por grama de fitomassa, enquanto outras plantas necessitam de 300 a 1.000 g (TAIZ E ZEIGER, 2004). As folhas possuem forma linear lanceolada, sem pecíolo, de cor verde escuro, com cutículas espessas e cerosas, dispostas em espiral ao redor do pseudocaule, formando uma roseta, o que favorece a retenção de água (ORTIZ e VAN DER MEE, 2006; MIELENZ et al., 2015; DAVIS et al., 2015). Tais características morfológicas conferem ainda proteção contra insetos e microrganismos patogênicos (SILVA e BELTRÃO 1999; NETO e MARTINS 2012). As folhas de sisal apresentam comprimento que pode atingir até dois metros, com média de 90 a 120 cm. (MOREIRA et al., 1999).

O comprimento das folhas, bem como o tempo até o momento ideal para o corte variam em função da qualidade dos tratamentos culturais, das condições locais e da altura da planta desde a sua plantação (PINTO, 1999). Nesse sentido, as formas de manejo bem como inovações tecnológicas empregadas desde a implantação do cultivo refletem na qualidade e produtividade da cultura.

O sisal é uma planta monocárpica, perene e semixerófila, sua reprodução é principalmente assexuada, formando uma inflorescência após seis a nove anos seguido da morte da planta (ASFAW, 2011). Após a queda das flores desenvolvem-se novas plantas denominadas bulbilhos. Os rebentos são originados dos rizomas

(caules subterrâneos), que também constituem material de propagação vegetativa. Uma planta de sisal produz entre 200 a 250 folhas durante o ciclo, com peso médio variando entre 400 g e 700 g e cada folha contém de 1000 a 1200 fios de fibras (ALVARENGA JÚNIOR, 2012). O sistema radicular é típico das monocotiledôneas, fasciculado, fibroso e em forma de turfo, sem a presença de uma raiz principal, possuindo assim dois tipos de raiz, a fixadora e a alimentadora (MOREIRA et al., 1999).

O clima ideal para o crescimento e desenvolvimento das *Agaves* é o quente, em que a temperatura média anual esteja entre 20 °C e 28 °C, com grande intensidade de luz, precipitações pluviais não excessivas e regulares. O sisal é uma planta que suporta a escassez de água, com adaptação às regiões tropicais e subtropicais, suportando secas prolongadas e temperaturas elevadas. Desenvolve-se também em climas temperados, sem excesso de chuvas, mas as regiões com excesso de frio são prejudiciais à cultura, devido a queimada das folhas e atraso no desenvolvimento da planta (RIBEIRO FILHO, 1967).

Pelo exposto, o Nordeste do Brasil, o sisal desenvolve-se bem na região semiárida, com temperatura média diária superior a 24 °C, altitude máxima de 600 m, precipitação média anual entre 650 mm e 1.250 mm, umidade relativa média anual do ar variando de 66% a 79% e ventos de 3 m/s (DANTAS et al., 2020).

2.2 Importância econômica do sisal

O gênero *Agave* abrange diversas espécies de interesse cultural, econômico, medicinal e ornamental para sua utilização por inúmeras populações em todo o mundo (DEBNATH et al., 2010; TORRE-RUIZ et al., 2016). As plantas desse gênero são originárias da América Central e do Norte e, atualmente, possuem ocorrência em países tropicais e subtropicais de diferentes partes do mundo, como Brasil, Angola, Tanzânia, Quênia, Madagascar, China, México, Moçambique, Etiópia, África do Sul, Malawi, China, Indonésia, Tailândia, Cuba, Haiti e Venezuela (SOUZA et al., 2021; FAO, 2024).

Antes da distribuição do sisal para várias partes do mundo, a partir das plantas propagadas no sul da Flórida, o México era detentor do mercado mundial de fibras de *Agave*, produzidas pelo *Agave fourcroydes*, conhecido como henequém, e esse país não produzia fibras a partir do *Agave sisalana* (SOARES et

al., 2020). Atualmente a *Agave sisalana* é a espécie mais utilizada para produção de fibras duras no mundo, sendo de grande importância sócio econômica para regiões semiáridas.

No Brasil, a espécie plantada para extração de fibra é a *Agave sisalana*, popularmente conhecida como sisal. O nome sisal deriva de um pequeno porto na península de Yucatán, no México, através do qual os primeiros suprimentos de fibras de *Agave* foram exportados, e a fibra tornou-se conhecida no comércio como Sisal ou 'cânhamo de sisal' (DEBNATH et al., 2010). No âmbito mundial, Angola, Quênia, Moçambique, Madagáscar, África do sul e Tanzânia (África); China, Indonésia e Tailândia (Ásia); México, Cuba e Haiti (América do Norte e Central) produzem fibras de sisal ou outras espécies de *Agave*, com uma produção mundial de aproximadamente 300.000 toneladas/ano (FAO, 2024).

Atualmente, o Brasil lidera a produção e exportação mundial de sisal, e cerca de 80% da produção brasileira é direcionada ao mercado externo (FREITAS et al., 2018). De acordo com os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a produção de sisal em 2024 foi de 98,4 mil toneladas, o que representa um aumento de 14,3% em comparação com o ano anterior, sendo esta produção influenciada pelas condições climáticas mais favoráveis, com reflexo no aumento de 12,9% na produtividade dos campos. No mesmo período, a área de produção de sisal cresceu apenas 1,3%, estimada em 100,3 mil ha em 2021. No entanto, mesmo com a liderança mundial, observa-se que a produção nacional anual atual diminuiu, e representa cerca de 36% da produção anual mundial de fibra de sisal (FAO, 2024).

A exportação de sisal totalizou US\$ 49,7 milhões no primeiro semestre de 2023, representando um aumento de 5,5% na comparação com igual período do ano passado. Em 2022, mesmo com a queda na quantidade, a exportação de sisal rendeu ao Brasil cerca de US\$ 84,7 milhões, o que corresponde a um aumento de 2,1% em relação a 2021.

No primeiro semestre de 2023, o Brasil exportou sisal para 72 países e, entre os principais destinos do sisal exportado, destacam-se a China e os Estados Unidos, com respectivas participações de 56,0% e 19,5% na quantidade exportada, seguidos por Portugal (6,0%), México (2,0%), Canadá (1,9%). Entre os principais produtos de sisal exportados, estão fibras têxteis, cordéis para atadeiras ou enfardadeiras, fios, cordas, tapetes e revestimentos para pisos (CONAB, 2024).

No Brasil, a cultura sisaleira está concentrada no Estado da Bahia, responsável por 94,2% da área cultivada no território brasileiro e os 5,8% restantes estão localizados na Paraíba (5,6%), Ceará (0,1%) e Rio Grande do Norte (0,1%) (IBGE, 2020). Na Bahia, o seu cultivo ocorre em 20 municípios que compõem o chamado Território do Sisal, dentre os quais se destacam, Conceição do Coité e Valente como os maiores produtores. Nesses municípios, o sisal é uma das culturas em que a sua cadeia de serviços se destaca pela geração de emprego e renda para mais de 600 mil pessoas, que estão envolvidas em atividades que vão desde a manutenção das lavouras até a confecção de produtos (RAYA et al., 2023).

Nesse contexto, o sisal apresenta uma relevância socioeconômica na Região Nordeste, sendo uma alternativa para o desenvolvimento de atividades produtivas nessas áreas e gerando emprego e renda em regiões que possuem uma escassez de alternativas. A cultura do sisal vem sendo estudada devido às inúmeras vantagens apresentadas, como: amplo cultivo nas regiões semiáridas da Bahia (SANTOS et al., 2017; LEITE et al., 2023); boa adaptação a climas tropicais e subtropicais; facilidade de cultivo e resistência a seca; por produzir uma fibra biodegradável que provém de fonte renovável (NAIVY e NAVA-CRUZ et al., 2014; CORBIN et al., 2015); possuir propriedades medicinais (DEBNATH et al., 2010); potencial para biocontrole de patógeno (DAMASCENO et al., 2015); isolante térmico e acústico, tenacidade, resistência à abrasão e baixo custo (DINIZ et al., 2020).

Recentemente, o sisal e outros Agaves vêm sendo estudados pelo potencial de serem fontes de energias renováveis com baixo consumo de água e exigências nutricionais (DAVIS et al., 2011; RAYA et al., 2023). No entanto, apesar da sua importância ambiental, econômica e social, a cultura do sisal no Brasil é explorada com baixo investimento em modernização agrícola e técnicas biotecnológicas e uso de insumos químicos e biológicos. Dentre as inovações biotecnológicas pode-se destacar a necessidade de produção de mudas de sisal com qualidade genética, nutricional e fitossanitária e o uso de microorganismos promotores de crescimento e agentes de biocontrole (SOARES et al., 2020).

Esta cultura vem sendo afetada pela podridão vermelha do pseudocaulo, o principal problema fitossanitário que causa a morte da planta, vem afetando só os plantios em todas as regiões produtoras de sisal e é transmitida pelos rebentos, que são o principal material de propagação (DUARTE et al., 2018). De acordo com

esta doença causada pelo fungo *Aspergillus welwitschiae* (DUARTE et al., 2023) coloca a produção de fibra de sisal no Brasil em risco de colapso devido à ocorrência deste fungo em 100% das plantas de *Agave sisalana*, das quais 20% já apresentavam sintomas, mas outros 10% ainda se encontravam assintomáticas (RAYA et al., 2023).

2.3 Utilização de bactérias promotoras de crescimento na Agricultura

Os primeiros trabalhos científicos envolvendo a introdução de antagonistas microbianos no controle de enfermidades de plantas foram iniciados na década de 1920-1940, com destaque para os chineses, utilizando rizobactérias como ativadores de defesa e promotoras de crescimento de plantas (VIEIRA JUNIRO, 2013). No Brasil, os primeiros trabalhos foram realizados na década de 80 com o objetivo de promover o crescimento de tomateiro e cafeeiro em condições de casa de vegetação (MARIANO et al., 2004).

Atualmente, diversos grupos de pesquisa no Brasil e no mundo trabalham com rizobactérias visando o controle de doenças e promoção do crescimento de plantas (VIEIRA JUNIOR et al., 2013; KAVAMURA et al., 2013; ANDRADE et al., 2016; SANTOS et al., 2020; SOUZA et al., 2021; NASCIMENTO et al., 2021; JARQUÍN-ROSALES et al., 2023; TELLES, NOGUEIRA E HUNGRIA, 2023).

As bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCP's) fazem parte da população residente na rizosfera das plantas e não são fitopatogênicas. Podem ser utilizadas para tratamento de sementes, explantes e mudas micropropagadas, incorporadas ao substrato de plantio, tratamento de estacas, tubérculos e raízes, pulverizações na parte aérea incluindo folhagem e frutos, e em pós-colheita (MARIANO et al., 2004; BALDOTO et al., 2010; FONSECA et al., 2020).

O uso de BPCP's na produção de mudas micropropagadas ainda necessita de mais estudos. Os efeitos benéficos das BPCP's sobre mudas micropropagadas são principalmente, aumento de área foliar, diâmetro de pseudocaulo, número de folhas e matéria seca, com conseqüente redução do tempo de aclimatização e maior sobrevivência das mudas após o transplante. Sabe-se que o uso de bactérias promotoras de crescimento é de grande importância na agricultura, visto que as mesmas diminuem a dependência de fertilizantes, pela associação benéfica das bactérias com as raízes das plantas, em que as bactérias podem promover o

crescimento vegetal, com a fixação biológica de nitrogênio, solubilização de fosfatos, síntese de fitohormônios, proteção a condições adversas, entre outros mecanismos (GUIMARÃES et al., 2017; FUKIMI, CEREZINI e HUNGRIA, 2018; SANTOS et al., 2018; COELHO et al., 2019; SANTOS et al., 2019; MOLINA et al. 2021). Além disso, como mecanismo de ação indireto, podem inibir o crescimento ou a ação de patógenos, agindo no controle de doenças de plantas (KUMAR et al., 2012; AHEMAD e KIBRET, 2014).

Perante a atual necessidade por novas tecnologias que visem diminuir os impactos negativos da agricultura tradicional, os micro-organismos associados à promoção de crescimento vegetal, demonstram ser uma excelente alternativa para a agricultura de maneira sustentável. A aplicação de bactérias promotoras de crescimento vegetal e fixadoras de nitrogênio é uma alternativa tecnológica que visa atender a essas necessidades, melhorando a fertilidade do solo e reduzindo os impactos causados por estresses bióticos e abióticos.

2.4 Bactérias promotoras de crescimento vegetal e seu potencial para amenizar estresse hídrico em condições semiáridas

As projeções climáticas indicam que muitas regiões semiáridas e áridas do mundo estarão sujeitas aos eventos de seca mais frequentes e extremos no futuro. A produção agrícola em muitas destas áreas já é vulnerável à seca, depende de grandes volumes de irrigação e é susceptível à degradação do solo (SCANLON et al., 2007).

A principal adversidade climática que afeta a produção agrícola é o déficit hídrico. O estresse hídrico é um dos estresses abióticos, mais prejudiciais que se intensificou nas últimas décadas, é considerado uma das maiores causas do aumento da improdutividade de importantes culturas (CONAB, 2024). A seca tem o maior efeito na produção agrícola, estima-se que 45% dos campos agrícolas em todo o mundo estão sujeitos a secas contínuas (YADAV et al., 2020; ADMASSIE et al., 2022). Os estudos relacionados as interações dos microorganismos com as plantas e a diversidade desses associados as plantas em regiões semiáridas, ainda são poucos.

No entanto, existe uma grande possibilidade de se encontrar microrganismos

que apresentem potencial biotecnológico nunca antes estudado (RYAN et al., 2007; LIRA-CADETE et al., (2011); PARRAY et al., 2016; SILVI et al., 2013). Nas últimas décadas, bactérias das espécies de *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Bacillus*, *Klebsiella*, *Enterobacter* e *Bulkholderia* têm sido reportadas por promover o crescimento de plantas (BPCP) (GLICK, 2015; KLOEPPER et al., 1991; OKON & LABANDERA-GONZALES, 1994). Pesquisas têm demonstrado que diversas culturas vegetais apresentam potencial de ser colonizadas por bactérias (CABALLERO-MELLADO et al., 2004; GYANESHWAR et al., 2001; SALA et al., 2008; MEDEIROS et al., 2006; LUNA et al., 2010).

Os mecanismos de promoção de crescimento pelas bactérias incluem diferentes ações, como a fixação biológica de nitrogênio (FONSECA et al., 2020), solubilização de fosfatos (SOUSA et al., 2022), biossíntese de fito- hormônios (LUCANGELI & BOTTINI, 1997), influência na atividade enzimática da 1aminociclopropano 1-carboxilato (ACC) deaminase (MOREIRA et al., 2023), controle biológico (BYRNE ET AL., 2005), síntese de sideróforos (LACAVA et al., 2008) e indução de resistência sistêmica a patógenos na planta hospedeira (KLOEPPER et al., 1999).

As bactérias diazotróficas possuem a enzima nitrogenase que possibilita quebra da ligação entre as moléculas de N₂ e disponibilizam nitrogênio para o solo e plantas. A pesquisadora Jhoanna Doberainer foi pioneira nos estudos de FBN no Brasil, suas pesquisas possibilitaram o desenvolvimento dos estudos nessa área, tornou o Brasil o segundo maior produtor de soja do mundo. Na safra de 2019-2020, a substituição do fertilizante nitrogenado por inoculantes no cultivo da soja gerou uma economia estimada de 15,2 bilhões de dólares (TELLES, NOGUEIRA E HUNGRIA, 2023).

Em seus estudos, Costa e Melo (2005) isolaram bactérias da palma forrageira e conseguiram observar que em 69 linhagens, 10 apresentaram o gene nifH, que indica se o micro-organismo é ou não um fixador de N₂. Os autores chegaram à conclusão de que o uso dessas bactérias na inoculação de plântulas de palma contribui para o melhor desenvolvimento em solos com déficit hídrico. Bergamaschi et al. (2007), estudando sorgo forrageiro e bactérias diazotróficas, avaliaram 14 genótipos de sorgo forrageiro e observaram que 76 isolados apresentaram capacidade de fixar nitrogênio e produzir ácido indol-acético *in vitro*. Esses resultados demonstraram o potencial desses isolados como possíveis

promotores de crescimento vegetal em ambientes de baixa precipitação.

Antunes et al. (2015), avaliando a quantidade de comunidades diazotróficas endofíticas em Coroa de Frade (*Melocactus* sp.), planta nativa do bioma Caatinga, encontraram valores de células bacterianas por grama de raiz que variaram de $7,48 \times 10^4$ a $109,85 \times 10^4$. Esses resultados indicam que plantas nativas possuem elevada população de bactérias potencialmente diazotróficas.

Santana et al. (2020) avaliaram a inoculação de bactérias promotoras de crescimento de plantas no sorgo em condições de seca e concluíram que o crescimento da planta e a nutrição de nitrogênio tiveram prejuízos devido a essa condição, porém, a inoculação de diferentes bactérias foi capaz de reduzir alguns efeitos negativos da escassez de água. Os autores notaram que houve um aumento no acúmulo de nitrogênio na parte aérea ocasionado por todas as cepas, demonstrando que elas apresentam uma capacidade diazotrófica mesmo sob estresse hídrico. A inoculação de *Bacillus* sp. ESA 402 foi a que demonstrou potencial para futuros testes de campo.

Chang et al. (2007) relataram que *Pseudomonas putida* é capaz de produzir um exopolissacarídeo (EPS) denominado de alginato. Essa substância teve influência positiva no desenvolvimento de biofilme e proporcionou um ambiente favorável ao crescimento vegetal, mesmo em condições de pouca água. O biofilme contribuiu para a manutenção de um microambiente hidratado, protegendo a comunidade contra a dessecação.

Costa e Melo (2012), isolando e determinando a diversidade de bactérias endofíticas em palma forrageira (*Opuntia ficus-indica*) e observaram que 14 isolados produziram ácido inodole acético (AIA) variando entre 3,5 e 17,45 $\mu\text{g} \cdot \text{ml}^{-1}$, sendo esses capazes de promover o crescimento vegetal em condições de seca.

Niu et al. (2018) isolaram cepas bacterianas de raízes de painço (*Setaria italica* L.), uma cultura tolerante à seca que é cultivada em regiões semiáridas do Nordeste da China e selecionaram quatro isolados por sua capacidade de produzir ACC desaminase e com tolerância à seca. Esses autores concluíram que as raízes de painço estavam associadas a uma variedade de rizobactérias que expressavam alta tolerância ao estresse hídrico, favorecendo o crescimento vegetal e atuando diretamente na proteção das plantas sob essas condições ambientais adversas.

Santos et al. (2014) realizaram ensaio com girassol avaliando o crescimento

vegetal em função da inoculação de sementes com bactérias promotoras de crescimento e concluíram que não houve aumento no crescimento da planta. Quanto à tolerância ao déficit hídrico, com a inoculação de *Bacillus* sp. os autores observaram que em condições normais de umidade do solo, a combinação destas bactérias, proporcionou um aumento do crescimento do girassol, além de, aumentar a capacidade das plantas sob estresse hídrico de realizarem o ajustamento osmótico, pelo maior acúmulo de solutos orgânicos compatíveis.

Lira-Cadete et al. (2011) estudaram Bactérias Associadas a plantas do Bioma Caatinga no Semiárido Nordeste e observaram uma ampla diversidade de genótipos bacterianos associados à rizosfera e raiz das plantas dos gêneros *Ziziphus* sp., *Aspidosperma* sp., *Terminalia* sp., *Caesalpinia* sp., *Cobretum* sp., *Myracrodruon* sp. Segundo os autores existe uma grande densidade populacional associada à raiz e rizosfera de plantas da Caatinga.

3.0 REFERÊNCIAS

ALVARENGA JÚNIOR, E. R.; Dossiê Técnico. Cultivo e aproveitamento do sisal. **Fundação Centro Tecnológico Minas Gerais**, 2012.

ANDRADE, A.T.; CONDÉ, A.B.T.; COSTA, R.L.; POMELA, A.W.V.; SOARES, A.L.; MARTINS, F.A.D.; LIMA, W.T.; OLIVEIRA, C.B.D. Produtividade de milho em função da redução do nitrogênio e da utilização de *Azospirillum brasilense*. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**. 15: 229-239, 2016.

ANTUNES, G. dos R. **Diversidade e eficiência na promoção do crescimento vegetal por bactérias isoladas de plantas forrageiras do Semiárido**. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade do Vale do São Francisco, Petrolina, 2016.

ANTUNES, G. R.; ESCOBAR, I. E. C.; CAVALCANTE, A. B.; PINTO, T. F.; FERNANDES J. R. Quantificação das Comunidades de Bactérias Fixadoras de Nitrogênio associadas à *Melocactus* sp. In: **IV Congresso de Palma e outras Cactáceas**, 2015, Salvador. IV. Anais...Congresso de Palma e outras Cactáceas, 2015.

ARRUDA, L.; MARTINS, A, B.; MARTINS, A; LISBOA, B.; LOPES, C.; BERTOLO, F; PASSAGLIA, L. M. P.; VARGAS, L, K. Screening of rhizobacteria isolated from maize (*Zea mays* L.) in Rio Grande do Sul State (South Brazil) and analysis of their potential to improve plant growth. **Applied Soil Ecology**, p. 15–22, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.09.001>.

BABALOLA, O. O. Beneficial bacteria of agricultural importance. **Biotechnology Letters**, v 32, p. 1559-1570, 2010.

BAL, H.B; NAYAK, L. S.; ADHYA, T.K. Isolation of ACC desaminase producing PGPR a partir da rizosfera do arroz e avaliação na promoção de crescimento vegetal. **Plant Soil**.v. 36, n.6, P.93-105 (2013).

BALDOTTO, L.E.B.; BALDOTTO, M.A.; OLIVEIRA, F.L.; VIANA, A.P.; BRESSAN-SMITH, R. Seleção de bactérias promotoras de crescimento de abacaxizeiro 'Vitória' durante a aclimação. **Revista de Brasileira de Ciência do Solo**. 34:349-360, 2010

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

CAMPOS, H.; TREJO, C.; PEÑA-VALDIVIA, C.B.; GARCÍA-NAVA, R.; CONDE-MARTÍNEZ, F.V.; CRUZ-ORTEGA, M.; DEL R. A aclimação fotossintética ao estresse hídrico em mudas de *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck depende em grande parte da dissipação térmica e do aumento do fluxo de elétrons para o fotossistema I. **Pesquisa de Fotossíntese** 122: 1-17, 2014.

CHANG, W. S.; VAN DE MORTEL, M.; NIELSEN, L.; NINO DE GUZMAN, G.; LI, X; HALVERSON, L. J. Alginate production by *Pseudomonas putida* creates a hydrated microenvironment and contributes to biofilm architecture and stress tolerance under water-limiting conditions. **Journal Bacteriol** v. 189, p. 8290– 8299, 2007.

COLEMAN-DERR, D.; DESGARENNES, D.; FONSECA-GARCIA, C.; GROSS, S; CLINGENPEEL, S.; WOYKE, T. O compartimento vegetal e a biogeografia afetam a composição do microbioma em espécies cultivadas e nativas de *Agave*. **Novo Fitólogo**. V, 209. P, 798-811. doi: 10.1111/nph.13697.

COSTA F. E. C; MELO I. S. Endophytic and rhizospheric bacteria from *Opuntia ficus-indica* mill and their ability to promote plant growth in cowpea, *Vigna unguiculata* (L.) Walp. **African Journal Microbiol Res**, v. 6, p. 1345–1353, 2012.

DANTAS, E. S. B.; SUINAGA, F. A.; ALVES, I.; COSTA, L. B.; SOUSA, M. F.; BELTRÃO, N. E. M.; SILVA, O.R.R.F.; CARTAXO, W. V.; COUTINHO, W.M. Sisal: **Árvores do conhecimento**. 2022. Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacaotecnologica/cultivos/sisal/equipe_editorial.

ETESAMI, H; BEATTIE, G. A. Plant-Microbe Interactions in Adaptation of Agricultural Crops to Abiotic Stress Conditions. **Probiotics and Plant Health**, Springer, p. 163–200, 2017.

FAO (2024). Divisão de estatísticas da FAO. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/> (Acessado em 13 de junho de 2024)

FERREIRA, E. P. B.; KNUPP, A. M; MARTIN-DIDONET, C. C. G. Crescimento de cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.) influenciado pela inoculação com bactérias promotoras de crescimento de plantas. **Bioscience Journal, Uberlândia**, v. 30, n. 3, p. 655-665, 2014.

FIGUEIREDO, M.V.B.; LIRA JUNIOR, M.A.; MESSIAS, A.S.; MENEZES, R.S.C. Potential impact of biological nitrogen fixation and organic fertilization on corn yield in low external input systems. Corn crops production: growth, fertilization and yield. New York: **Nova Science Publishers**, 2009. p. 239-267.

FONSECA, A.J.; TASSONE, G.A.T.; CARNEIRO, M.A.C.; CARVALHO, G.R.; CARVALHO, C.H.S.; BOTELHO, C.E. Roles of arbuscular mycorrhizal fungi on acclimatization of clones of *Coffea arabica* L. produced by somatic embryogenesis. **Ciência e Agrotecnologia**, 44:11-20, 2020.

GAMALERO, E; BONA, E.; TODESCHINI, V.; & LINGUA, G. Saline and Arid Soils: Impact on Bacteria, Plants, and their Interaction. **Biology**, v. 9, p. 116, 2020.

GARCÍA-MENDOZA, A. J. Distribution of *Agave* (Agavaceae) in Mexico. **Cactus and Succulent Journal**, v. 74, n. 4, p. 177-188, 2002.

GUIMARÃES, V. F.; BATTISTUS, A. G.; SOUZA, A. K. P. de; BULEGON, L. G.; OFFEMANN, L. C.; INAGAKI, A. M. Bactérias Promotoras de Crescimento Vegetal: da FBN à regulação hormonal, possibilitando novas aplicações. **Ciências agrárias: Ética do cuidado, legislação e tecnologia na agropecuária**, p. 192–212, 2017.

JARQUÍN-ROSALES, D.; VALLE, J.R.R.;ALPUCHE-OSORNO, J.J.; RODRIGUEZ-ORTIZ, G.; CAMPOS-ÁNGELES, G.V.; MORALES, I. *Agave angustifolia* bulbil growth in different substrates, with doses of fertigation and inoculation with *Azospirillum brasilense*. **Ciência Rural**, v. 53, p. 201-213, 2023.

KAVAMURA, V. N.; SANTOS, S. N; SILVA, J. L.; PARMA, M. M; AVILA, L. A.; VISCONTI, A.; ZUCCHI, T. D.; TAKETANI, R. G.; ANDREOTE, F. D.; MELO, I. S. Screening oh brazilian cacti rhizobacteria for Plant growth under drought. **Microbiological Research**. v. 168, p, 183-191, 2013.

KLOEPPER, J. W.; ZABLOTOWICZ, R. M.; TIPPING, E. M.; LIFSHITZ, R. Plant growth promotion by bacterial rhizosphere colonizers. The rhizosphere and plant growth. **Kluwer Academic Publishing**, 1991. pp. 315-326.

LIRA-CADETE, L.; FARIAS, A. R. B. de; LIMA, D. R. M.; RAMOS, A. P. S. de; LIU, F. Plant growth-promoting rhizobacteria affect the growth and nutrient uptake of *Fraxinus americana* container seedlings. **Applied Microbiology and Biotechnology**, p. 4617–4625, 2013.

LUNA, M. F.; GALAR, M. L.; APREA, J.; MOLINARI, M. L.; BOIARDI, J. L. Colonization of sorghum and wheat by seed inoculation with *gluconacetobacter diazotrophicus*. **Biotechnology Letters**, n. 32, p. 1071-1076, 2010.

MEDINA, J. C. O sisal. São Paulo: **Secretaria da Agricultura do Estado de São Paulo**, 1954.

MEENA, K. K.; SORTY, A. M.; BITLA, U. M.; CHOUDHARY, K.; GUPTA, P.; PAREEK, A.; SINGH, D. P.; PRABHA, R; SAHU, P. K.; GUPTA, V. K. Abiotic

stress responses and microbe mediated mitigation in plants: the omics strategies. **Front Plant Sci.** v. 8, 2017.

MEENA, M. D.; JOSHI, P. K.; JAT, H. S.; CHINCHMALATPURE, A.; NARJARI, B. Changes in biological and chemical properties of saline soil amended with municipal solid waste compost and chemical fertilizers in a mustard–pearl millet cropping system. **Catena**, v. 140, p. 1–8, 2016.

MOREIRA, F.M.; CAIRO, P.A.R.; NASCIMENTO, L.R.; ROSA, R.C.C.C.; ROCHA, L.S.; HADDAD, F. Optimal growth and N use efficiency enhancements by growth promoting rhizobacteria in seedlings banana under N₂ deficiency. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v.50, n.102734, 2023.

MULLER, A.; SCHADER, C.; EL-HAGE SCIALABBA, N.; BRÜGGEMANN, J.; SENSEE, A.; ERB, K.-H.; SMITH, P.; KLOCKE, P; LEIBER, F.; STOLZE, M. Strategies for feeding the world more sustainably with organic agriculture. **Nature Commun**, v. 8, p. 1290, 2017.

NASCIMENTO, R.J.; CAVALCANTI, M.I.P.; CORREIA, A.J.; ESCOBAR, I.E.C.; FREITAS, D.S.; NÓBREGA, R.S.A.; FERNANDES-JÚNIOR, P.I. Maize-associated bacteria from the Brazilian semiarid region boost plant growth and grain yield. **Symbiosis**. 83: 347–359, 2021.

NETO, I.L.C.; MARTINS, F.M. Anatomia dos oorgãos vegetativos de Agave sisalana Perrine (Agavaceae). **Revista Caatinga**. V,25. P, 72-78. Disponível onlineem:<https://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/caatinga/article/view/2251/p df>.

NIU, X.; SONG, L.; XIAO, Y.; G.E.W. Drought-tolerant plant growth-promoting rhizobacteria associated with foxtail millet in a semi-arid agroecosystem and their potential in alleviating drought stress. **Frontiers in microbiology**, v. 8, p. 2580, 2018.

PARRAY, J. A.; JAN, S; KAMILI, A. N.; QADRI, R. A.; EGAMBERDIEVA, D; AHAMAD, P. Current perpectives on plant growth-promting rhizobacteria. **Journal Plant Growth Reg.** v. 35, n., 3, p. 1-26, 2016.

RAYA, F. T.; QUINTILHA-PEIXOTO, G.; OLIVEIRA, A. B.; MARONE, M. P. R; VILELA, W. J.; OLIVEIRA, M. J.; OLIVEIRA, G. O.; ALMEIDA, R. L.; FALCÃO FILHO, C. A. T.; COSTA, O. D. V.; RIBEIRO, R. V.; SOARES, A. C. F; GOÉS-NETO, A.; PEREIRA, G. A. G. Molecular epidemiology of sisal bole rot disease suggests a potential phytosanitary crisis in Brazilian production áreas. **Frontiers in Chemical Engineering**,v.5, 2023. DOI=10.3389/fceng.2023.117468.

RIBEIRO FILHO, J. Cultura do sisal. **Universidade Rural do Estado de Minas Gerais**. Viçosa – MG, 1967.

SANTANA, S.R.A.; VOLTOLINI, T.V.; ANTUNES, G. DOS R.; SILVA, V.M.; SIMÕES, W.L; MORGANTE, C.V; FREITAS, A.D.S; CHAVES, A.R.M.; AIDAR, S. DE T; FERNANDES-JÚNIOR, P.I. Inoculation of plant growth-promoting bacteria attenuates the negative effects of drought on sorghum. **Archives of Microbiology**,

v. 202, n. 5, p. 1015-1024, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00203-020-01810-5>.

SANTOS, J. F. D.; SACRAMENTO, B. L. D.; MOTA, K. N. A. B.; SOUZA, J. T. D.; AZEVEDO NETO, A. D. D. Crescimento de girassol em função da inoculação de sementes com bactérias endofíticas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 44, p. 142-150, 2014.

SANTOS, A.F.J.; MORAIS, J.S.; MIRANDA, J.S.; MOREIRA, Z.P.M.; FEITOZA, A.F.A.; LEITE, J.; FERNANDES-JÚNIOR, P.I. Cacti-associated rhizobacteria from Brazilian Caatinga biome induce maize growth promotion and alleviate abiotic stress. **Food and Bioproducts Processing**. 15: 82-97, 2020.

SILVA, O.R.R.F.; BELTRÃO, N.E.M. O agronegócio do sisal no Brasil. Brasília: **Embrapa**. 1999.

SILVI, S; BARGHINI, P.; AQUILANTI, A.; JUAREZ-JIMENEZ, B.; FENICE, M. Physiologic and metabolic characterization of a new marine isolate (BM39) of *Pantoea* sp producing high levels of exopolysaccharide. **Microbial Cell Factories**, v. 34, p. 233-245, 2013.

SOUSSI, A.; FERJANI, R.; MARASCO, R.; GUESMI, A.; CHERIF, H.; ROLLI, E.; MAPELLI, F.; OUZARI, H. I.; DAFFONCHIO, D.; CHERIF, A. Plant-associated microbiomes in arid lands: diversity, ecology and biotechnological potential. **Plant Soil**, p.1-14, 2015.

SOUZA, J.S.; SILVA, A.C.M.; SANTOS, A.F.J.; SANTOS, P.O.; ALVES, P.S.; CRUZ-MAGALHÃES, V.; MARBACH, P.A.S.; LOGUERCIO, L.L. Endophytic bacteria isolated from both healthy and diseased *Agave sisalana* plants are able to control the bole rot disease. Biological Control. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. 157:104-575, 2021.

TELLES, T. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Economic value of biological nitrogen fixation in soybean crops in Brazil. **Environmental Technology & Innovation**, V. 31, p. 103-158, 2023, ISSN 2352-1864, <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103158>.

VUORINNE, I.; HEISKANEN, J & PELLIKKA, PK (2021). Avaliando a biomassa foliar de *Agave sisalana* usando índices de vegetação Sentinel-2 **Sensoriamento remoto**, v. 13, n. 2, p. 220-233, 2021.

YAN, N.; MARSCHNER, P.; C.A.O, W.; ZUO, C.; QINA, W. Influence of salinity and water content on soil microorganisms. **International Soiland Water Conservation Research**, p. 316–323, 2015.

ZAFAR-UL-HYE, M.; AHMAD, M.; MUHAMMAD SHAHZAD, S. Synergistic effect of rhizobia and plant growth promoting rhizobacteria on th growth and nodulation of lentil seedlings under axenic conditions. **Soil & Environment**, v. 32, 2013.

Uso e potencial de bactérias promotoras de crescimento vegetal provenientes de regiões semiáridas como biocondicionadores do estresse hídrico: Uma revisão sistemática

Resumo: As plantas são comumente expostas a vários estresses abióticos, dentre eles, a seca é responsável por diversos distúrbios fisiológicos nos vegetais, o que ocasiona em redução na absorção de nutrientes e, conseqüentemente, no crescimento e na produtividade das culturas agrícolas. A seleção e utilização de bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCP) é uma estratégia simples e de baixo custo para reduzir o impacto da seca nas diferentes espécies e tem sido adotada como uma medida promissora nos últimos anos. Esta revisão sistemática (RS) traz novas contribuições para o estudo do uso e potencial de BPCP de regiões semiáridas como biocondicionadores do estresse hídrico. Foram avaliados artigos depositados em diferentes bases de dados eletrônicas utilizando uma *string* de busca e critérios de inclusão e exclusão pré-definidos. Esta RS demonstra que as BPCP vêm sendo aplicadas em diversas espécies vegetais para testes de tolerância a seca. Entre as culturas agrícolas em que mais se aplicam BPCP estão o milho, trigo e soja e outros estudos abrangem *Arabidopsis*, a importante cultura modelo. A Etiópia foi o país com maior diversidade de gêneros sendo o maior número de artigos com *Pseudomonas*, *Klebsiella* e *Serratia*. Na Índia, China, Irã e Brasil prevaleceram as publicações com os gêneros *Bacillus* e *Pseudomonas*. As informações reunidas nesta RS ajudam a entender o estado atual do uso de BPCP como biocondicionadores do estresse hídrico em regiões semiáridas. Para o uso amplo e eficiente desses microrganismos, os pesquisadores precisam utilizar estudos de campo e familiarizar os agricultores com os benefícios que esses microrganismos podem ter na sanidade das plantas e na qualidade do solo para melhorar a tolerância ao estresse da planta por seca no futuro.

Palavras-chave: semiárido, ambientes sazonalmente secos, BPCP, seca.

Use and potential of plant growth-promoting bacteria from semi-arid regions as water stress bioconditioners: A systematic review

Abstract: Plants are commonly exposed to various abiotic stresses, among them, drought is responsible for several physiological disorders in plants, which leads to a reduction in nutrient absorption and, consequently, in the growth and productivity of agricultural crops. The selection and use of plant growth promoting bacteria (PGPB) is a simple and low-cost strategy to reduce the impact of drought on different species and has been adopted as a promising measure in recent years. This systematic review (SR) brings new contributions to the study of the use and potential of PGPB from semiarid regions as bioconditioners of water stress. Articles deposited in different electronic databases were evaluated using a search string and predefined inclusion and exclusion criteria. This SR demonstrates that PGPB has been applied in several plant species for drought tolerance tests. Among the agricultural crops in which PGPB is most applied are corn, wheat and soybean, and other studies include Arabidopsis, the important model crop. Ethiopia was the country with the greatest diversity of genera, with the highest number of articles on *Pseudomonas*, *Klebsiella* and *Serratia*. In India, China, Iran and Brazil, publications on the genera *Bacillus* and *Pseudomonas* prevailed. The information gathered in this SR helps to understand the current status of the use of BPCP as bioconditioners for water stress in semiarid regions. For the widespread and efficient use of these microorganisms, researchers need to embark on field studies and familiarize farmers with the benefits that these microorganisms can have on plant health and soil quality for drought stress relief in the future.

Key words: semiarid, seasonally dry environments, BPCP, drought

1. INTRODUÇÃO

As plantas são comumente expostas a uma ampla gama de estresses bióticos e abióticos que podem inibir significativamente o crescimento e desenvolvimento da planta. Entre os fatores de estresse bióticos que limitam o crescimento e desenvolvimento das plantas destacam-se os vírus, nematoides, insetos, bactérias fitopatogênicas e fungos fitopatogênicos (GAMALERO e GLICK, 2022). Já os estresses abióticos que são prejudiciais para as plantas incluem condições de luz, quando excessivamente alta ou baixa, temperaturas extremas, salinidade, inundações, alto teor de sal, metais tóxicos, contaminantes orgânicos, radiação excessiva e seca (PANDEY et al., 2017; VAUGHAN et al., 2018).

A seca é responsável por diversos distúrbios fisiológicos nas plantas, o que ocasiona na redução e absorção de nutrientes e, conseqüentemente, o crescimento e a produtividade das plantas. A redução da umidade do solo desencadeia várias respostas bioquímicas nas plantas, resultando no fechamento dos estômatos para reduzir a perda de água e, concomitantemente, a absorção de dióxido de carbono (CO₂), diminuindo a taxa fotossintética (CHANDRA et al., 2021).

As terras áridas cobrem aproximadamente 30% da área terrestre do mundo (BONATELLI et al., 2020). Particularmente em regiões semiáridas e sazonalmente secas, os estresses abióticos (seca, salinidade, altas temperaturas) têm um impacto significativo na microbiota associada à planta (LACERDA-JÚNIOR et al., 2019; GETAHUN et al., 2020). De acordo com Massa et al. (2022) plantas e micróbios possuem algumas adaptações e interações que lhes permitem sobreviver nesses ambientes hostis e superar essas condições adversas.

Algumas estratégias para reduzir o impacto da seca nas diferentes espécies têm sido adotadas nos últimos anos, e a seleção de bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCP)

associadas a plantas representa uma das abordagens mais promissoras (BRILLI et al., 2019). Assim, a inoculação de BPCP selecionadas pode atuar na redução desses efeitos. As BPCP são grupos de bactérias que podem ser encontradas na rizosfera (ADMASSIE et al., 2022). O termo "bactérias promotoras do crescimento vegetal" refere-se a bactérias que colonizam as raízes das plantas (rizosfera) e melhoram o crescimento das plantas. A rizosfera é o ambiente do solo onde a raiz da planta está disponível e é uma zona de máxima atividade microbiana, resultando em um pool de nutrientes no qual macro e micronutrientes essenciais são extraídos (VEJAN et al., 2016).

Na rizosfera microbiana podem ser encontradas bactérias, fungos, actinomicetos, protozoários e algas. No entanto, as bactérias são os micróbios mais abundantes presentes na rizosfera (KAYMAK et al., 2010). Para Nakkeeran et al. (2005) uma BPCP ideal deve possuir alta competência rizosférica, ter capacidade de melhorar o crescimento das plantas, ter um amplo espectro de ação, ser seguro para o ambiente, ser compatível com outras rizobactérias e ser tolerante ao calor, radiação UV e agente oxidante. A estimulação do crescimento da planta por PGPB pode ocorrer por uma variedade de mecanismos diretos ou indiretos (GAMALERO et al., 2022).

A promoção direta do crescimento da planta por BPCP pode ocorrer pela bactéria, fornecendo à planta um ou mais fitormônios, como auxina, citocinina ou giberelina, ou melhorando a capacidade de uma planta de adquirir nutrientes do solo, fornecendo às plantas ferro sequestrado, fosfato solubilizado, zinco e potássio, nitrogênio fixo e atividade de deaminase ACC (GAO et al., 2019). Já a promoção indireta do crescimento da planta pelo BPCP ocorre quando o BPCP atua como um agente de biocontrole e pode impedir que os fitopatógenos (fungos ou bactérias) inibam o crescimento da planta. Isso pode ocorrer de várias maneiras diferentes, incluindo a síntese de antibióticos inibidores de patógenos e/ou cianeto de hidrogênio pelo BPCP (GAMALERO et al., 2022).

Diversos estudos foram publicados com a perspectiva de

demonstrar o papel das BPCP, em diferentes culturas como pimenta (LIM et al., 2013; PATEL e AMARESAN; ADMASSIE et al., 2022), milho (VURUKONDA et al., 2016; SKZ e VURUKONDA, 2018; VISHNUPRADEEP et al., 2022); trigo (NADERI et al., 2022; PATEL et al., 2022); canola (MA et al., 2016; TANVEER et al., 2023), sorgo (SANTANA et al., 2020), entre outras. Mas, ainda não há um estudo que resuma de forma sintética e sistematizada a aplicabilidade das BPCP para a compreensão do status atual.

As Revisões Sistemáticas (RS) visam fornecer uma síntese abrangente e imparcial de muitos estudos relevantes em um único documento, por meio de buscas sistematizadas em bases de dados eletrônicas. É muito utilizada em pesquisas na área humana, em especial na busca de informações sobre eficiência de fármacos (BABAČIĆ et al., 2019; MAGANTI et al., 2022). Para isso, é baseada em métodos sistemáticos e definidos a priori na identificação e seleção dos estudos, extração dos dados e análise dos resultados. Assim, as RSs têm contribuído atualmente para diversas áreas do conhecimento. Portanto, para fornecer informações atuais sobre o tema e colaborar com as pesquisas coletadas até o momento, este artigo apresenta uma revisão sistemática sobre o uso e potencial de bactérias promotoras de crescimento vegetal de regiões semiáridas como biocondicionadores do estresse hídrico a partir de estudos realizados nos últimos 10 anos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O software StArt (State of the Art through Systematic Review) versão Beta .0.3 (http://lapes.dc.ufscar.br/tools/start_tool), foi utilizado para a elaboração desta revisão sistemática. A ferramenta foi desenvolvida pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e tem por objetivo dar suporte aos pesquisadores em toda etapa de elaboração da RS.

Os procedimentos adotados pelo StArt seguem as diretrizes Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses

(PRISMA). O PRISMA é um conjunto de itens baseado em evidências que visa ajudar os autores científicos a relatar uma ampla gama de revisões sistemáticas e metanálises, utilizado na área vegetal, animal e principalmente para avaliar os benefícios e danos de uma intervenção de saúde.

Assim, o processo de revisão utilizando o StArt se deu em três etapas, sendo elas: planejamento, execução e sumarização.

2.1 Planejamento

Na etapa de planejamento foi realizada a elaboração do protocolo, fazendo uso de uma edição disponibilizada pelo software StArt, o qual contém as seguintes informações: título do artigo, autores, objetivo, palavras-chave, questões de pesquisa, fontes de pesquisa, critérios de inclusão/exclusão e definição do tipo de estudo. O protocolo foi registrado e encontra-se disponível para acesso no seguinte link: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8196011>. As questões desta RS estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1- Questões levantadas sobre o uso e potencial de bactérias promotoras de crescimento vegetal como biocondicionadores do estresse hídrico em regiões semiáridas.

Questões
Q1. Em quais espécies vegetais estão associadas bactérias promotoras de crescimento vegetal no semiárido?
Q2. Quais são as principais espécies ou gêneros de bactérias promotoras de crescimento vegetal no semiárido?
Q3. Quais são as regiões semiáridas em que estão associadas bactérias promotoras de crescimento vegetal?
Q4. Em quais culturas foram aplicadas bactérias promotoras de crescimento vegetal do semiárido?
Q5. Quais são os métodos e protocolos adotados para aplicação de bactérias promotoras de crescimento vegetal?

2.2 Execução

Por meio da estratégia baseada nos quatro componentes de inclusão PICOS - População, Intervenção, Comparação, Desfecho e Tipo de estudo (COSTA SANTOS et al., 2007) (Tabela 2) elaboramos a seguinte questão de pesquisa: "Bactérias promotoras de crescimento vegetal são eficientes como biocondicionadores do estresse hídrico em regiões semiáridas?". O uso de PICOS propicia uma melhor especificidade e clareza dos problemas, promovendo estratégias de busca mais complexas, que permite a obtenção de resultados mais precisos durante a busca.

Tabela 2- Termos PICOS para a "questão" de pesquisa utilizada em uma revisão sistemática sobre o uso e potencial de bactérias promotoras de crescimento vegetal como biocondicionadores do estresse hídrico em regiões semiáridas nos últimos 10 anos.

Descrição	Abreviação	Componentes da pergunta
População/Condição	P	Plantas sob estresse hídrico
Interesse / Intervenção	I	Bactérias biocondicionadores do estresse hídrico e promotoras de crescimento vegetal de regiões semiáridas
Comparação	C	Outros microrganismos biocondicionadores de estresse hídrico ou outros métodos de intervenção contra a seca.
Desfecho	O	Identificação de bactérias promotoras de crescimento vegetal de regiões semiáridas para aliviar o estresse abiótico seca
Tipo de estudo	S	Artigos científicos

No total, sete bancos de dados eletrônicos foram utilizados: Springer (<https://link.springer.com/>), Portal de Periódicos CAPES (<https://www-periodicos-capes-gov-br.ez103.periodicos.capes.gov.br/index.php?>), Web of Science ([h](#)

<https://www-webofscience.ez103.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/basic-search>), Scopus
 (https://www.scopus.com/search/form.uri?display=basic#basic), PubMed
 Central (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/>), Science Direct
 (https://www.sciencedirect.com/) e CABI direct (https://www-cabdirect.ez103.periodicos.capes.gov.br/).

As buscas foram realizadas de abril de 2023 a julho de 2023. Durante o processo de busca pelos artigos, dois filtros foram utilizados diretamente nas bases: apenas artigos científicos e artigos publicados de 2014 até 2023. Os resultados das buscas em cada base foram importados para os formatos BIBTEX, MEDILINE ou RIS, todos compatíveis com StArt.

Na tabela 3 é exibida estratégia de busca nos bancos de dados. Para tornar a consulta significativa. O conector lógico OR foi utilizado para agrupar as palavras-chave sinônimas e AND para agrupar as partes principais (Tabela 3).

Tabela 3- Palavras-chave de busca utilizadas para a revisão sistemática sobre o uso e potencial de bactérias promotoras de crescimento vegetal como biocondicionadores do estresse hídrico em regiões semiáridas nos últimos 10 anos.

Database	Keywords
Springer Portal de Periódicos CAPES Web of Science Scopus PubMed Central Science Direct	("plant growth-promoting bacteria" OR PGPB) AND (drought OR "hydric stress" OR "drought tolerance" OR dry) AND (semiarid)

Em seguida foram realizadas as etapas de seleção e extração. Nessas fases, foram utilizados os critérios predeterminados de inclusão: (I) artigos que respondessem às questões do protocolo (Tabela 1) e exclusão: (E) teses, dissertações, manuais; (E) capítulo de livro; (E) artigos não escritos em inglês;

(E) revisões de literatura; (E) artigos que não contemplassem o tema.

2.3 Sumarização

A etapa de sumarização incluiu a elaboração de gráficos, mapas bibliométricos, tabelas e nuvens de palavras para compor a RS.

A fim de reduzir qualquer viés na elaboração da RS, foi utilizado o checklist PRISMA (PAGE et al., 2021) disponível no seguinte endereço: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8196018>.

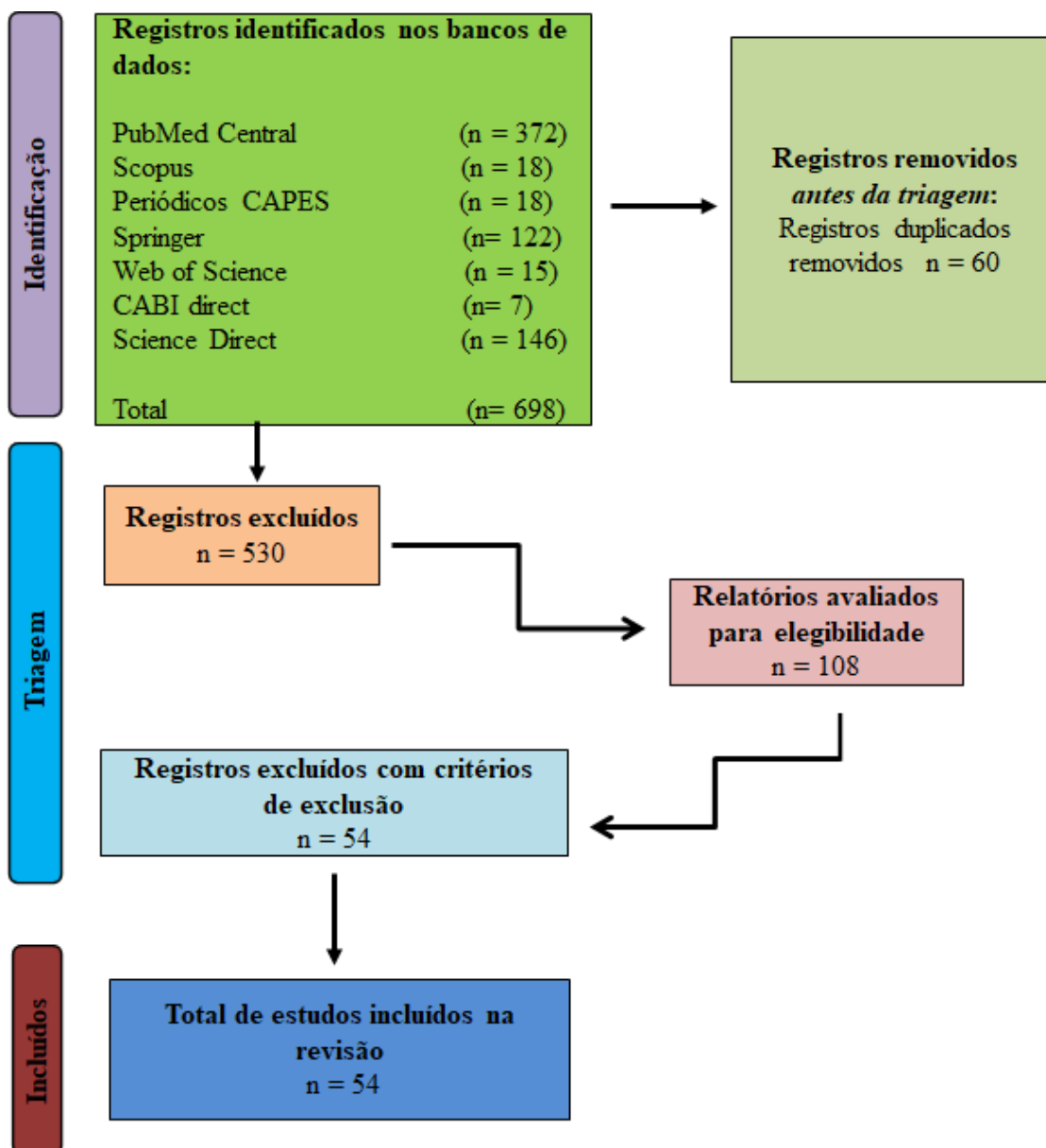
3.0 RESULTADOS

3.1 Pesquisa em bancos de dados

As buscas eletrônicas nas bases de dados com o StArt retornaram um total de 698 artigos (Figura 1). O PubMed central contribuiu com o maior número de artigos (372), seguido do Science Direct (146) e o Springer (122). As bases de dados Periódicos CAPES, Scopus, Web of Science e CABI direct, contribuíram com 18, 18, 15 e 7 artigos, respectivamente.

Foram excluídos 60 artigos que estavam duplicados e 530 na etapa de seleção após a leitura dos resumos e palavras-chave. Na etapa de extração, 108 estudos foram analisados e após leitura dos artigos por completo, 54 foram excluídos por não atenderem aos critérios de inclusão. Dessa forma, foram aceitos 54 artigos para compor a revisão sistemática (Figura 1). Para fins de consulta, uma lista dos manuscritos foi registrada e armazenada no seguinte link: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8197988>.

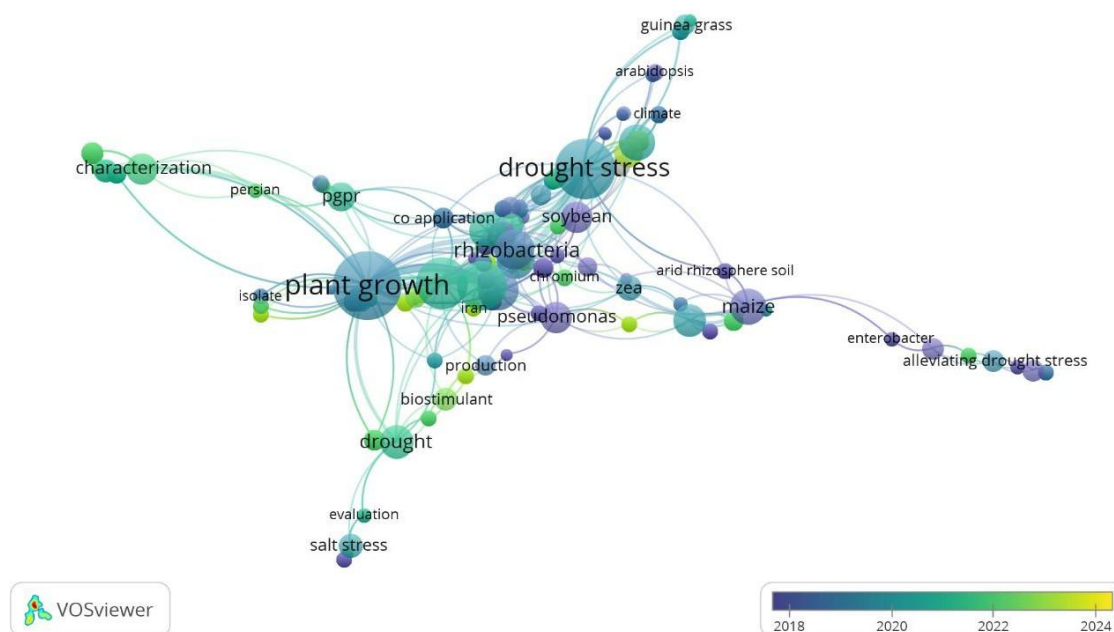
Figura 1: Diagrama de fluxo PRISMA de estudos incluídos na revisão sistemática sobre o uso e potencial de bactérias promotoras de crescimento vegetal como biocondicionadores do estresse hídrico em regiões semiáridas nos últimos 10 anos.



3.2 Análises bibliométricas

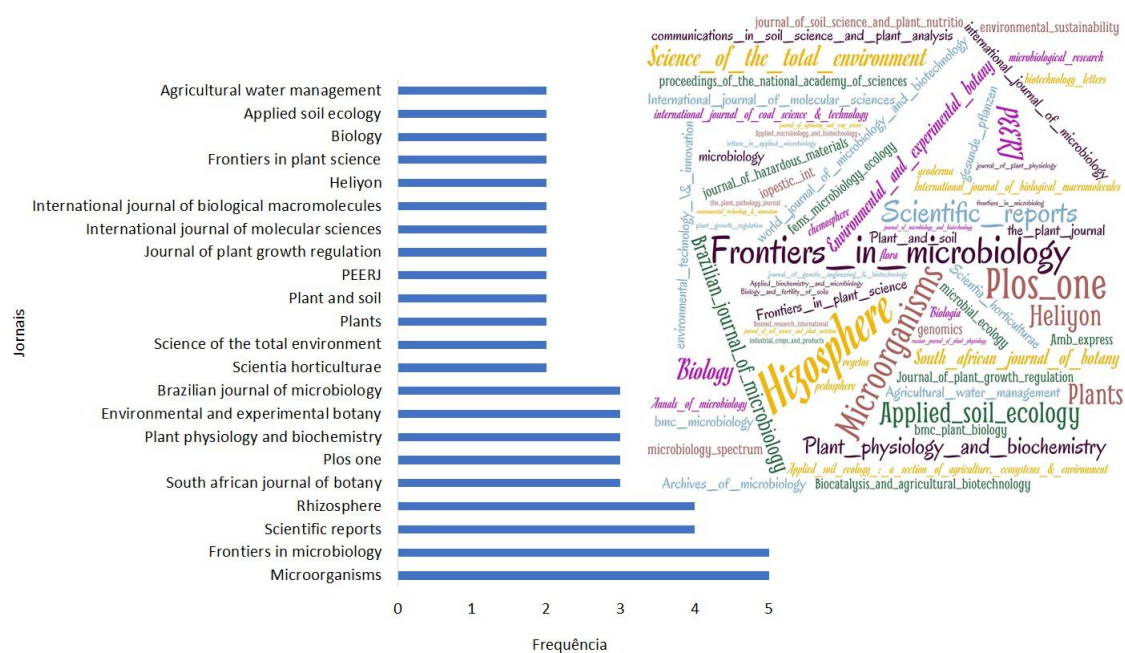
Um mapa bibliométrico foi gerado a partir da frequência de palavras-chave dos artigos inseridos (n=54) (Figura 2). É possível observar que a frequência de estudos gerados foi maior entre os anos de 2018 a 2021. Além disso, dois grupos principais foram observados na análise, de acordo com tamanho do círculo, formados pelos termos Plant growth e drought stress. Esses termos aparecem em maior frequência nos artigos relacionados e com maior relevância e estão relacionados a outros termos, como *Rhizobacteria* e *Pseudomonas* e às culturas milho, soja e Arabidopsis (Figura 2). A relação entre esses termos sugere que as bactérias promotoras de crescimento vegetal estão, de fato, associadas com a tolerância ao estresse hídrico, e que o gênero *Pseudomonas* está sendo aplicado nessas culturas com essa finalidade. Foi possível observar ainda que o termo bioestimulante foi mais relevante a partir de 2023, o que indica que a utilização de bactérias promotoras de crescimento vegetal vem sendo utilizada como produtos comerciais.

Figura 2: Mapa bibliométrico de palavras-chave dos artigos aceitos sobre o uso e potencial de bactérias promotoras de crescimento vegetal como biocondicionadores do estresse hídrico em regiões semiáridas nos últimos 10 anos.



Para descobrir quais revistas científicas possuem maior número de publicações sobre o uso e potencial de bactérias promotoras de crescimento vegetal como biocondicionadores do estresse hídrico em regiões semiáridas, foi feita uma nuvem de palavras com a frequência das mesmas (Figura 3). A revista com maior frequência foi a *Microorganisms* e *Frontiers in Microbiology*, seguida de *Scientific Reports*, *Rhizosphere*, *South African Journal of Botany* e *Plos One*. Outras revistas como *Plant Physiology and Biochemistry*, *Environmental and Experimental Botany* e *Brazilian Journal of Microbiology* tiveram uma frequência notável (Figura 3). O conjunto de revistas que abrangem o estudo permite inferir sobre a qualidade das informações levantadas, uma vez que são revistas com fator de impacto relevante na área de estudo.

Figura 3: Frequência de revistas que mais publicaram sobre o uso e potencial de bactérias promotoras de crescimento vegetal em estresse hídrico nos últimos 10 anos.

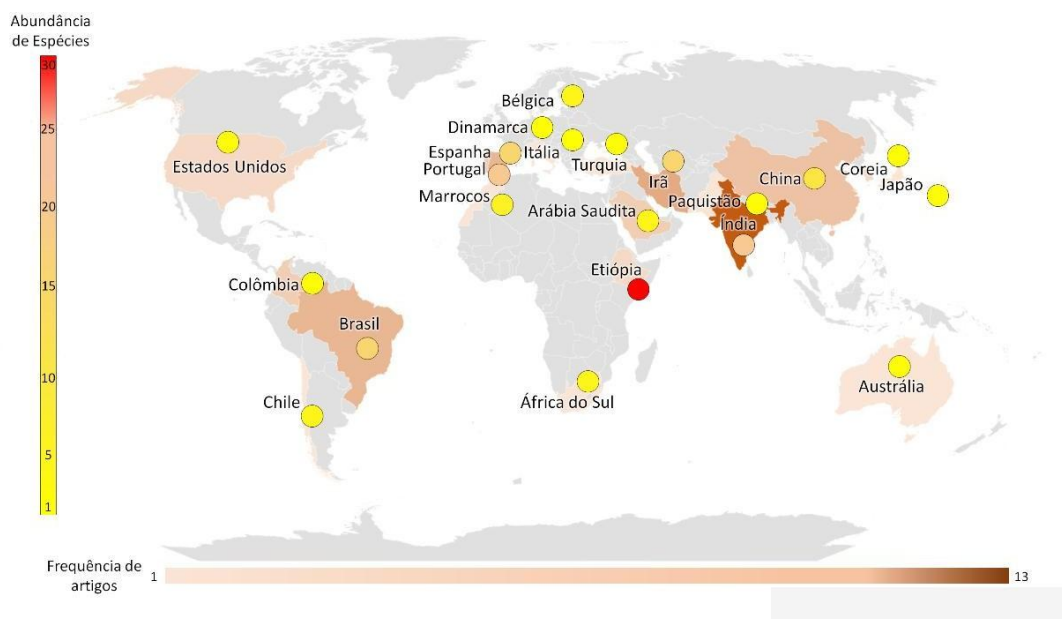


3.3 Bactérias associadas à estresse hídrico em regiões semiáridas

O mapa na Figura 4 demonstra em quais regiões geográficas foram identificadas e isoladas bactérias promotoras de crescimento vegetal que tiveram potencial para uso como biocondicionadoras de plantas em condições de estresse hídrico. No geral, o maior número de artigos é proveniente da Índia (13), seguido do Irã (6), Brasil (5), Espanha (5), China (4), Arábia Saudita (3), Colômbia (3), Portugal (3), Coréia (2), Estados Unidos (2) e Etiópia (2). Os demais países tiveram frequência de artigos igual a 1 (Figura 4).

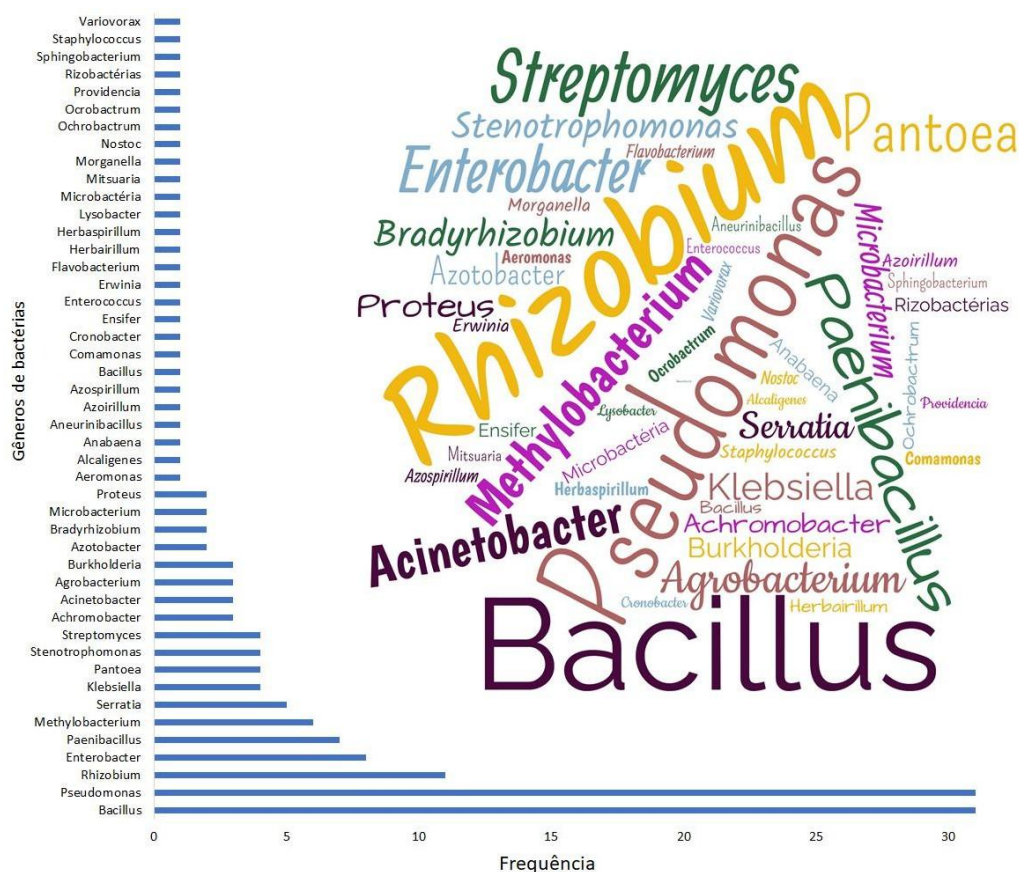
Embora a Índia seja o país com a maior frequência de artigos, a Etiópia é onde foram encontradas mais espécies ou gêneros de bactérias distintas (29 gêneros ou espécies diferentes), seguida de Índia (20), Portugal (20), Brasil (15), Espanha (14), Irã (14) e China (10). Os demais países tiveram abundância de espécies ou gêneros abaixo de 6. A tabela 4 mostra em detalhes os locais de origem, bem como as fontes de cada uma das bactérias caracterizadas nos estudos.

Figura 4. Locais dos estudos incluídos nesta revisão sistemática relatando os países que mais realizaram estudos sobre bactérias promotoras de crescimento vegetal de regiões semiáridas como biocondicionadoras do estresse hídrico. Os círculos com coloração variando do amarelo ao vermelho indicam a abundância de espécies ou gêneros de bactérias em cada país.



Dentre os gêneros de bactérias que predominaram em relação a frequência de ocorrência nos artigos selecionados, o gênero *Bacillus* foi superior aos demais (34), seguido do gênero *Pseudomonas* (30) (Figura 5). Os gêneros de bactérias com frequências intermediárias foram *Rhizobium* (11), *Paenibacillus* (10) e *Enterobacter* (9). Alguns outros gêneros tiveram baixas frequências como *Methylobacterium* (6), *Serratia* (5), *Stenotrophomonas* (5) *Streptomyces* (4), *Pantoea* (4), *Klebsiella* (4). Uma ampla gama de gêneros apresentou frequências de 1 a 3 artigos (Figura 5).

Figura 5. Frequência de gêneros de bactérias em publicações sobre o uso e potencial de bactérias promotoras de crescimento vegetal como biocondicionadoras do estresse hídrico nos últimos 10 anos.



35

A tabela 4 apresenta a descrição sumária das espécies e gêneros que foram relatados. Observa-se que a maioria dos estudos não identificou as bactérias em nível de espécie e que grande parte descreveu apenas os gêneros encontrados. A Etiópia foi o país com maior diversidade de gêneros relatado, sendo o maior número de artigos com *Pseudomonas*, *Klebsiella* e *Serratia*. (Tabela 4). Nos países como Índia, China e Irã, prevaleceram as publicações com os gêneros *Bacillus* e *Pseudomonas* além de uma variedade de gêneros presentes na frequência de um artigo. No Brasil houve diversidade de gêneros encontrados nos artigos, com a prevalência de *Bacillus* presente em seis de 17 artigos encontrados, seguido do gênero *Bradyrhizobium*. Em Portugal os gêneros *Paenibacillus* e *Pseudomonas* foram mais relatados e na Espanha foram *Bacillus* e *Rhizobium* (Tabela 4).

Em relação a fonte observa-se que a maior parte dos estudos inseridos utilizou o solo rizosférico para isolamento das bactérias, alguns estudos utilizaram bactérias previamente isoladas e

provenientes de coleções, como as Coleções coordenadas belgas de microrganismos (BCCM/LMG), Coleção de cultura microbiana da Universidade de Alzahra e as Coleções do Departamento de Biologia Vegetal e Ecologia da Universidade do País Basco (UPV/EHU) (Tabela 4).

Tabela 4. Bactérias de regiões secas relacionadas em artigos sobre promoção de crescimento de plantas e tolerância ao estresse hídrico.

Autor	Bactéria	Local de origem	Fonte	Planta hospedeira
Warrad et al. (2020)	<i>Streptomyces</i> sp.	Arábia Saudita		<i>Zea mays</i>
Jain et al. (2023)	<i>Paenibacillus polymyxa</i> <i>Pseudomonas stutzeri</i> <i>Bacillus sonoresis</i>	Índia	Solo rizosférico	<i>Cyamopsis tetragonoloba</i> <i>Cymbopogon citratus</i> <i>Panicum turgidum</i>
Barnawal et al. (2013)	<i>Bacillus subtilis</i>	Índia	Solo rizosférico	<i>Cymbopogon citratus</i>
Selim et al. (2019)	<i>Actinobacterias</i>	Arábia Saudita	Solo rizosférico	<i>Panicum turgidum</i>
Sá et al. (2019)	<i>Flavobacterium</i>	Portugal	Nódulos (Cardoso et al. 2018)	<i>Ornithopus compressus</i>
	<i>Agrobacterium</i>			<i>Medicago lupulina</i>
	<i>Rhizobium</i>			<i>Scorpiurus vermiculatus</i>
	<i>Herbaspirillum</i>			<i>Vicia sativa subsp. sativa</i>
	<i>Achromobacter</i>			<i>Ornithopus. sativus subsp. sativus</i>
	<i>Erwinia</i>			<i>V. benghalensis</i>
	<i>Acinetobacter</i>			<i>O. pinnatus</i>
<i>Pseudomonas</i>	<i>Lotus corniculatus</i>			
<i>Stenotrophomonas</i>	<i>Medicago sp.</i>			
<i>Lysobacter</i>				
<i>Variovorax</i>				
<i>Paenibacillus</i>				
Kour et al. (2020)	<i>Pseudomonas libanensis</i>	Índia	Solo rizosférico	<i>Trigo</i> <i>Milho</i> <i>Arroz</i>

				Sorgo Milheto
Mengual et al. (2016)	<i>Streptomyces</i>	Espanha	Solo rizosférico	<i>R. lycioides</i>
Lima et al. (2023)	<i>Bacillus spp.</i>	Brasil	Coleções	Não informado
Xie et al. (2019)	<i>Bacillus pumilus</i>	China	Não informado	<i>Glycyrrhiza uralensis</i>
Mendoza-Labrador et al. (2021)	<i>Bacillus sp.</i>	Colômbia	Coleções (Moreno-Galván et al. 2019, 2020)	<i>Capim-guiné e milho</i>
De Araújo et al. (2020)	<i>Staphylococcus edaphicus</i> <i>Streptomyces alboflavus</i>	Brasil	Solo rizosférico e solo volumoso	<i>Mimosa bimucronata</i>
Barra et al. (2017)	<i>Enterobacter sp.</i> <i>Serratia sp.</i> <i>Pseudomonas sp.</i> <i>Microbactéria sp.</i> <i>Achromobacter sp.</i>	Chile	Tecidos e solo rizosférico (Barra et al. 2016)	<i>Persea americana</i>
Suvala et al. (2019)	<i>Bacillus sp.</i>	Índia	Solo	Não informado
Barbosa et al. (2018)	<i>Bradyrhizobium sp.</i>	Brasil	Não informado	Amendoim (<i>Arachis hypogaea</i>)
Lotfi et al. (2022)	<i>Bacillus velezensis</i> <i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	Irã e Turquia	Solo rizosférico	Nogueira-da-Pérsia (<i>Juglans regia</i>)
Liu et al. (2013)	<i>Bacillus subtilis</i>	China	Solo rizosférico	Nozes
Eida et al. (2018)	<i>Cronobacter</i> <i>Pantoea</i>	Arábia Saudita	Solo, rizosfera e endosfera	<i>Euphorbia granulata</i> <i>Panicum turgidum</i> <i>Zygophyllum simplex</i> <i>Tribulus terrestris</i>
Armada et al. (2014)	<i>Bacillus megaterium</i> <i>Enterobacter sp.</i> <i>Bacillus thuringiensis</i> <i>Bacillus sp.</i>	Espanha	Solo	<i>Lavandula dentata</i> <i>Salvia officinalis</i>
Saleem et al.	<i>Enterobacter</i>	Paquistão	Solo rizosférico	<i>Mucuna (Mucuna)</i>

(2018)	<i>Bacillus</i>	ão	(Saleem et al. 2015)	<i>pruriens</i>)
Karimzad et al. (2023)	<i>Bacillus wiedmannii</i>	Irã	Solo	Trigo
Niu et al. (2018)	<i>Pseudomonas migulae</i> <i>Enterobacter hormaechei</i> <i>Pseudomonas fluorescens</i> <i>Pseudomonas fluorescens</i>	China	Raiz	Milheto foxtail (<i>Setaria italica</i>)
Zhang et al. (2020)	<i>Pseudomonas fluorescens</i> <i>Pseudomonas koreensis</i> <i>Pseudomonas putida</i> <i>Pseudomonas lini</i> <i>Bacillus filamentosus</i> <i>Serratia plymuthica</i>	China	Solo rizosférico	Jujuba (<i>Ziziphus jujuba</i>)
Chandra et al. (2018)	<i>Pseudomonas spp.</i>	Índia	Solo	Não informado
Liu et al. (2023)	<i>Bacillus paralicheniformis</i>	Dinamarca	Produto comercial	Não informado
Rostamian et al. (2023)	<i>Azotobacter</i> <i>Azospirillum</i> <i>Microbacterium</i> <i>Pseudomonas</i>	Irã	Soil and Water Research Institute (SWRI)	Não informado
Delshadi et al. (2017)	<i>Azotobacter vinelandii</i> <i>Pantoea agglomerans</i> <i>Pseudomonas putida</i>	Irã	Rizosfera	Culturas cultivadas no campo
Jorge et al. (2019)	<i>Methylobacterium radiotolerans</i> <i>Methylobacterium jeotgali</i> <i>Methylobacterium phylosphaerae</i> <i>Methylobacterium oryzae</i>	Bélgica	Coleções coordenadas belgas de microrganismos (BCCM/LMG)	Não informado

	<i>Methylobacterium organophilum</i> <i>Methylobacterium oxalidis</i>	Japão	Biological Resource Center, NITE (NBRC)	Não informado
Igiehon et al. (2019)	<i>Rhizobium sp</i> <i>Rhizobium tropici</i> <i>Rhizobium cellulolyticum</i> <i>Rhizobium taibaishanense</i> <i>Ensifer meliloti</i>	África do Sul	Solo rizosférico	<i>Arachis hypogaea</i> (amendoim)
Niza-Costa et al. (2022)	<i>Paenibacillus amylolyticus</i> <i>Paenibacillus xylanexedens</i> <i>Paenibacillus pabuli</i> <i>Stenotrophomonas maltophilia</i> <i>Enterobacter hormaeche</i>	Portugal Espanha	Solo rizosférico	<i>Medicago sativa</i> (Alfafa silvestre) <i>Bituminaria bituminosa</i> (Trevo silvestre)
Kang et al. (2014)	<i>Pseudomonas putida</i>	Coréia	Solo	Vários campos agrícolas
Abbasi et al. (2023)	<i>Anabaena sphaerica</i> <i>Nostoc pruniforme</i>	Irã	Coleção de cultura microbiana da Universidade de Alzahra	Não informado
Naveed et al. (2014)	<i>Enterobacter sp.</i> <i>Burkholderia phytofirmans</i>	Austrália	Raízes (Prischl et al. (2012))	Milho
Lim et al. (2013)	<i>Bacillus licheniformis</i>	Coréia	Jung et al. (2006)	Não informado
Ma et al. (2016)	<i>Pseudomonas libanensis</i> <i>Pseudomonas reactans</i> <i>Rizobactérias serpentina</i>	Portugal	Rizosfera	<i>Phleum phleoides</i> <i>Trifolium repens</i>
Santana et al. (2020)	<i>Enterobacter sp.</i> <i>Bacillus sp.</i>	Brasil	Raízes (Fernandes-Júnior et al. 2015) Raízes (Fernandes-	<i>Trigonella spicata</i>

				Júnior et al. 2015)	
				Raízes (Fernandes-Júnior et al. 2015)	
	<i>Rhizobium sp.</i>			Raízes (Antunes et al. 2019)	<i>Cenchrus ciliaris</i>
	<i>Bacillus sp.</i>			Raízes (Antunes et al. 2019)	
	<i>Agrobacterium sp.</i>			Raízes (Antunes et al. 2019)	<i>sorgo bicolor</i>
	<i>Bacillus sp.</i>			(Hungria et al. 2010)	<i>Zea mays</i>
	<i>Azospirillum brasilense</i>			Solo rizosférico (Baldani et al. 1986)	<i>Oryza sativa</i>
	<i>Herbaspirillum seropedicae</i>				
Patel et al. (2017)	<i>Bacillus spp.</i> <i>Alcaligenes sp</i> <i>p.</i> <i>Proteus sp.</i> <i>Aneurinibacillus aneurinilyticus</i>	Índia	Solo rizosférico		<i>Commiphora wightii</i>
Ali et al. (2014)	<i>Pseudomonas sp</i>	Índia	Solo rizosférico e solo não-rizosférico		Diferentes sistemas de produção agrícola
Kumar et al. (2018)	<i>Bacillus e Pseudomonas sp.</i>	Índia		Rathi et al. (2018)	<i>Opuntia ficus-indica</i>
Huang et al. (2017)	<i>Burkholderia sp.</i> <i>Mitsuaria sp.</i>	Estados Unidos	Rizosfera		<i>Arabidopsis thaliana</i>
Hnini et al. (2022)	<i>Streptomyces</i> <i>Stenotrophomonas</i> <i>Microbacterium</i> <i>Klebsiella</i> <i>Bacillus</i> <i>Pseudomonas</i>	Marrocos	Nódulos radiculares e solo		<i>Vachellia tortilis</i> subsp. <i>Raddiana</i>
Vurukonda et al. (2016)	<i>Pseudomonas putida</i>	Índia	Solo rizosférico		<i>Berinjela (Solanum melongena)</i>
Armada et al. (2016)	<i>Bacillus thuringiensis</i>	Espanha	solos rizosféricos		Várias espécies arbustivas autóctones
Cesari et al. (2019)	<i>Bradyrhizobium sp.</i>	Brasil		MIRCEN/FEPAG RO, Brazil	Não informado
Vishnupradeep et al. (2022)	<i>Proteus mirabilis</i>	Índia	Rizosfera		<i>Zea mays</i>

	<i>Providencia sp.</i>			
	<i>Enterococcus gallinarum</i>			
	<i>Bacillus thuringiensis</i>			
	<i>Paenibacillus polymyxa</i>			
	<i>Agrobacterium tumefaciens</i>			
	<i>Ochrobactrum intermedium</i>			
	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i>			
	<i>Pseudomonas putida</i>			<i>Juniperus</i>
Getahun et al. (2020)	<i>Pseudomonas plecoglossicida</i>	Etiópia	Solo rizosférico	Acácia (<i>Acacia abyssinica</i>)
	<i>Pseudomonas fulva</i>			
	<i>Pseudomonas fluorescens</i>			
	<i>Klebsiella michiganensis</i>			
	<i>Klebsiella oxytoca</i>			
	<i>Morganella morganii</i>			
	<i>Serratia marcescens</i>			
	<i>Serratia fonticola</i>			
Naderi et al. (2022)	<i>Pantoea agglomerans</i>	Irã	Rizomas e raízes	<i>Stipagrostis pennata</i>
	<i>Pseudomonas sp.</i>			
Moreno-Galván et al. (2020)	<i>Bacillus spp.</i>	Colômbia	Solo rizosférico	Capim-guiné (<i>Megathyrsus maximus</i>)
	<i>Bacillus anthracis</i>			
	<i>Paenibacillus kribbensis</i>			
Braga et al. (2022)	<i>Bacillus siamensis</i>	Brasil	Solo rizosférico	<i>Mimosa artemisiana</i>
	<i>Sphingobacterium spiritivorum</i>			
Brilli et al. (2019)	<i>Pseudomonas chlororaphis</i>	Itália	Rizosfera	Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i>)

Patel et al. (2022)	<i>Pseudomonas stutzeri</i> <i>Bacillus tequilensis</i>	Índia	Solo rizosférico	Não informado
Del-Canto et al. (2023)	<i>Rhizobium giardinii</i> <i>Rhizobium gallicum</i> <i>Rhizobium phaseoli</i> <i>Rhizobium etli</i>	Espanha	Coleções do Departamento de Biologia Vegetal e Ecologia da Universidade do País Basco (UPV/EHU)	Feijão comum
Admassie et al. (2022)	<i>Bacillus spp.</i> <i>Pseudomonas spp.</i> <i>Stenotrophomonas spp.</i> <i>Enterobacter spp.</i> <i>Achromobacter spp.</i> <i>Comamonas spp.</i> <i>Acinetobacter spp.</i> <i>Burkholderia spp.</i> <i>Serratia spp.</i> <i>Ocrobactrum spp.</i> <i>Pantoea spp.</i> <i>Rhizobium spp.</i> <i>Aeromonas spp.</i> <i>Klebsiella spp.</i>	Etiópia	Amostras rizosféricas e endofíticas	Pimenta (<i>Capsicum annuum</i>)
SkZ et al. (2018)	<i>Pseudomonas putida</i>	Índia	Rizosfera	Berinjela (<i>Solanum melongena</i>)
Vargas et al. (2019)	<i>Pseudomonas</i>	Estados Unidos	Raízes	<i>Schizachyrium scoparium</i>
Kumar et al. (2017)	<i>Bacillus altitudinis</i>	Índia	Filosfera	<i>Oryza sativa</i>

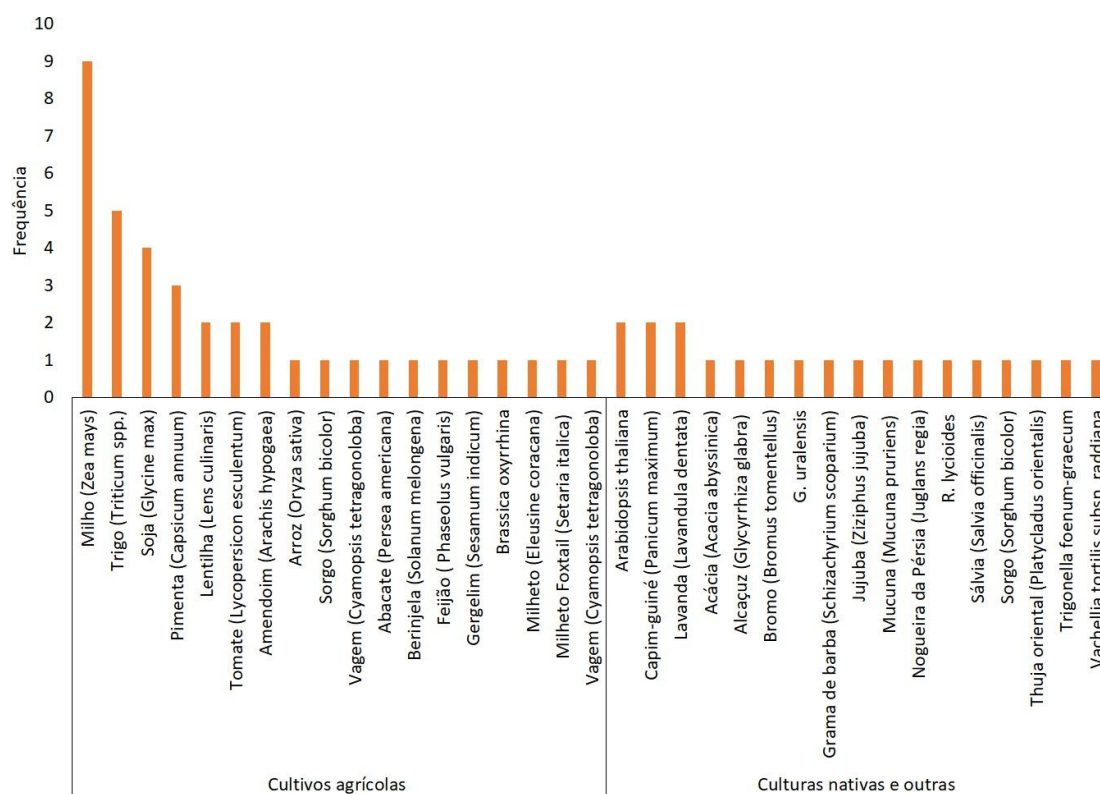
3.4 Aplicações de bactérias provenientes de regiões semiáridas

A aplicação de bactérias promotoras de crescimento vegetal para testes de tolerância à seca ocorreu em diferentes culturas, sendo

as mais estudadas o Milho (9), o Trigo (5) e Soja (4). Outras culturas como Pimenta (3), Lentilha (2), Tomate (2) e Amendoim (2) foram estudadas. As demais espécies de cultivos agrícola tiveram frequência de 1 artigo (Figura 6). Esses dados estão de acordo com o mapa bibliométrico apresentado na figura 2, onde os termos referentes a essas espécies foram evidenciados.

Com relação a espécies nativas ou outras espécies estudadas *Arabidopsis thaliana*, Capim-guiné (*Panicum maximum*) e Lavanda (*Lavandula dentata*) tiveram a maior frequência, com 2 artigos por espécie. Outras 14 espécies nativas específicas de diferentes regiões foram relatadas em 1 artigo cada (Figura 6).

Figura 6. Frequência de espécies vegetais onde foram aplicadas bactérias promotoras de crescimento vegetal como biocondicionadoras do estresse hídrico nos últimos 10 anos.



4.0 DISCUSSÃO

4.1 Pesquisa em bancos de dados

Esta revisão analisou sistematicamente a literatura existente sobre o uso e potencial de BPCP como biocondicionadores do estresse hídrico em regiões semiáridas. A string de busca definida em nosso estudo capturou os estudos publicados nos últimos 10 anos (2013 a 2023) com o intuito de fornecer informações mais atuais sobre o tema e colaborar com as pesquisas coletadas até o momento.

O estudo integrado à análise bibliométrica permitiu identificar as palavras-chave e as revistas científicas que mais publicam os estudos relacionados as BPCP como biocondicionadores do estresse hídrico em

regiões semiáridas (Figura 2, 3 e 4). Essas análises confirmaram que nos últimos 10 anos as BPCP vem sendo altamente estudadas para aumentar a tolerância a seca em culturas como milho e soja e em pesquisas científicas na planta modelo *Arabidopsis thaliana*. Os dados do mapa bibliométrico permitiram inferir ainda que as BPCP estão sendo estudadas mais recentemente a fim de se obter um produto agrícola, como os bioestimulantes. De fato, diante da necessidade de reduzir custos com insumos químicos e de alcançar cultivos sustentáveis, essa estratégia é reconhecidamente promissora (BACKER et al., 2018).

4.2 Bactérias associadas a estresse hídrico em regiões semiáridas

Os 54 artigos científicos analisados em diferentes países buscam estratégias para reduzir o impacto da seca utilizando diferentes BPCP (Figura 5 A e B). Entre as principais espécies estudadas *Bacillus* e *Pseudomonas* tiveram maiores frequência nos estudos. Esse resultado está relacionado ao vasto conhecimento que já existe sobre a efetividade dessas bactérias. Espécies do gênero

Bacillus podem terem sido mais amplamente distribuídas em diferentes locais e adotada nos estudos por sua capacidade de formação de endósporos, esses esporos foram relatados como formas dormentes muito resistentes e capazes de suportar condições ambientais desfavoráveis. Além disso, essa característica permite que seja aplicado em formulações, como pó, por exemplo, característica extremamente importante para a indústria de produtos biológicos (PRAVEEN et al., 2014; LALLOO et al., 2010; PIGGOT e HILBERT, 2004).

O segundo gênero de bactérias mais estudado foi *Pseudomonas*. Sabe-se que o conhecimento sobre os benefícios desse grupo já é bem conhecido e estudado a muito tempo, no entanto, o conhecimento dos mecanismos envolvidos em sua ação como BPCP ainda não foi completamente estabelecido (WIDNYANA e JAVANDIRA, 2016).

Outros gêneros de bactérias relatadas foram *Serratia* e *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Herbairillum*, *Actinobacterias* e *Burkholderia* tiveram maiores frequência nos estudos. O interesse de países como a Etiópia, a Índia, o Brasil, a China e Portugal em utilizar as BPCP citadas dar-se pelo fato de que estas atuam aumentando a tolerância à seca de várias maneiras, seja fornecendo à planta fitormônios, como auxina, citocinina ou giberelina, melhorando a capacidade de uma planta de adquirir nutrientes do solo, e até mesmo fornecendo às plantas ferro, nitrogênio e ACC (DANISH, e HYE, 2019; XIE et al., 2019; AHMAD et al., 2022; KARIMZAD et al., 2023).

4.3 Aplicações de bactérias provenientes de regiões semiáridas

O papel das bactérias no crescimento das plantas em condições limitadas de água foi demonstrado em diversos estudos. A inoculação bacteriana melhorou a eficiência do uso da água, biomassa de raiz e parte aérea, conteúdo relativo de água e índice de estabilidade da membrana, reduzindo assim o efeito adverso do

estresse hídrico em plantas de trigo e tomate (MEENAKSHI et al., 2019; ABBASI et al., 2020). *Pseudomonas fluorescens* DR7 melhorou o crescimento da planta sob condições de estresse hídrico, aumentando a umidade do solo em milho de raposa (NIU et al., 2017). A inoculação com *Bacillus thuringiensis* e *Azospirillum brasilense* melhorou a área específica e o comprimento da raiz, bem como a área de projeção da raiz em feijão comum sob condições de seca (ARMADA et al., 2014).

É relatado que as BPCP aumentam a tolerância ao estresse hídrico nas culturas, elevando a produção de metabólitos celulares por regulação positiva ou negativa de genes (VURUKONDA et al., 2016). Por exemplo, alterando a expressão de genes de plantas como DREB1B-like ou ERD15 um mecanismo comum pelo qual BPCP pode utilizar para conferir tolerância ao estresse por déficit hídrico nas culturas (NAYLOR e COLEMAN-DERR, 2018).

As plantas expostas ao estresse por seca levaram à produção de ROS, como radicais ânion superóxido, oxigênio singlete, peróxido de hidrogênio, radicais hidroxila, etc., que reagem com biomoléculas como proteínas, lipídios e ácidos nucleicos e levam a danos oxidativos aos componentes celulares, dificultando suas funções normais. Foi relatado que a inoculação de BPCP reduz o dano oxidativo às plantas, causado pelo estresse hídrico, ativando os sistemas de defesa antioxidante nas plantas. BPCP (*Bacillus* spp. *Bacillus tequilensis*, *Pseudomonas chlororaphis*, *Pseudomonas stutzeri*) induziu uma expressão aumentada de enzimas antioxidantes como superóxido dismutase, peroxidase, catalase, polifenol oxidase, etc. em culturas estressadas pela seca (BRILLI et al., 2019; MORENO-GALVÁN et al., 2020; PATEL et al., 2022).

5.0 Considerações finais e perspectivas futuras

Os estresses abióticos nas plantas, incluindo seca, causam não apenas problemas ambientais, mas também sociais e enormes perdas econômicas no setor agrícola em todo o mundo. Para lidar com esses efeitos, foram desenvolvidas estratégias que vão desde o nível

molecular, com o isolamento e transferência de genes tolerantes para melhorar o crescimento de culturas, até o nível da planta inteira com melhoramento convencional. Com desafios nessas abordagens, uma abordagem simples e de baixo custo de uso de microrganismos tem sido vista como um meio promissor de amplo espectro de produzir os alimentos.

Neste estudo, descobriu-se que nos últimos 10 anos diversos estudos demonstraram que as BPCP promovem o crescimento da planta por vários mecanismos, como mobilização de nutrientes, solubilização de fosfato, produção de fitohormônios, modulação da maquinaria antioxidante, ajuste osmótico, manutenção da homeostase iônica, reprogramação metabólica e modulação de vias bioquímicas e moleculares, regulando genes responsivos à seca e tornando a cultura mais tolerante a condições de estresse. Assim, as BPCP são uma boa alternativa aos fertilizantes convencionais devido à relação custo-benefício, ecologia e sustentabilidade para aumentar a tolerância das plantas a vários estresses, incluindo a seca.

As BPCP que podem induzir a resistência das plantas a seca e uma variedade de estresses abióticos, particularmente aqueles que se assemelham a ambientes de campo, devem ser investigados para futuros projetos de pesquisa voltados para a promoção da agricultura sustentável. Muitos microrganismos potenciais já foram comercializados para uso contra a seca, por exemplo. Como o nitrogênio é uma fonte de nutrientes para as plantas, a maioria dos fertilizantes microbianos comercializados são produtos de organismos fixadores de nitrogênio, como *Azospirillum* spp., *Azotobacter* spp., *Actinorhizobium* spp. e *Rhizobium* spp. (KOZA et al., 2022). Isso foi atribuído à facilidade de manuseio e capacidade de formação de endosporos que facilita a colonização eficiente.

Para o uso amplo e eficiente de BPCPs, os pesquisadores precisam utilizar estudos de campo e familiarizar os agricultores com os benefícios que esses microrganismos podem ter na sanidade das plantas e na qualidade do solo. Essas abordagens parecem ser promissoras para melhorar a tolerância ao estresse da planta para a

seca no futuro.

6.0 REFERÊNCIAS

ABBASI, S.; MOHAMMADI, P. Improving drought tolerance and glycyrrhizin content of licorice plant by EPS-producing cyanobacteria. **Industrial Crops and Products**, 197, 116578, 2023.

ADMASSIE, M.; WOLDEHAWARIAT, Y.; ALEMU, T.; GONZALEZ, E.; JIMENEZ, J. F. The role of plant growth-promoting bacteria in alleviating drought stress on pepper plants. **Agricultural Water Management**, 272, 107831, 2022.

ALI, S. Z.; SANDHYA, V.; VENKATESWARRAO, L. Isolation and characterization of drought-tolerant ACC deaminase and exopolysaccharide-producing fluorescent *Pseudomonas* sp. **Annals of microbiology**, 64(2), 493-502, 2014.

ARMADA, E.; PROBANZA, A.; ROLDÁN, A.; AZCÓN, R. Native plant growth promoting bacteria *Bacillus thuringiensis* and mixed or individual mycorrhizal species improved drought tolerance and oxidative metabolism in *Lavandula dentata* plants. **Journal of plant physiology**, 192, 1-12, 2016.

ARMADA, E.; ROLDÁN, A.; AZCON, R. Differential activity of autochthonous bacteria in controlling drought stress in native *Lavandula* and *Salvia* plants species under drought conditions in natural arid soil. **Microbial ecology**, 67, 410-420, 2014.

BABAČIĆ, H.; MEHTA, A.; MERKEL, O.; SCHOSER, B. CRISPR-cas gene-editing as plausible treatment of neuromuscular and nucleotide-repeat-expansion diseases: A systematic review. **PloS one**, 14(2), e0212198, 2019.

BACKER, R.; ROKEM, J.S.; ILANGUMARAN, G.; LAMONT, J.; PRASLICKOVA, D.; RICCI, E.; SUBRAMANIAN, S.; SMITH, D.L. Plant Growth-Promoting Rhizobacteria: Context, Mechanisms of Action, and Roadmap to Commercialization of Biostimulants for Sustainable Agriculture. **Front Plant Sci.** 9:1473, 2018.

BARBOSA, D. D.; BRITO, S. L.; FERNANDES, P. D.; FERNANDES-JÚNIOR, P. I.; LIMA, L. D. Can Bradyrhizobium strains inoculation reduce water deficit effects on peanuts? **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, 34, 1-11, 2018.

BARNAWAL, D.; MAJI, D.; BHARTI, N.; CHANOTIYA, C. S.; KALRA, A. ACC deaminase-containing *Bacillus subtilis* reduces stress ethylene-induced damage and improves mycorrhizal colonization and rhizobial nodulation in *Trigonella foenum-graecum* under drought

stress. **Journal of Plant Growth Regulation**, 32, 809-822, 2103.

BARRA, P. J.; INOSTROZA, N. G.; MORA, M. L.; CROWLEY, D. E.; JORQUERA, M. A. Bacterial consortia inoculation mitigates the water shortage and salt stress in an avocado (*Persea americana* Mill.) nursery. **Applied Soil Ecology**, 111, 39-47, 2017.

BENEVENUTO, R. F.; VENTER, H. J.; ZANATTA, C. B.; NODARI, R. O.; AGAPITO-TENFEN, S. Z. Alterations in genetically modified crops assessed by omics studies: Systematic review and meta-analysis. **Trends in Food Science & Technology**, 2022.

BONATELLI, M. L.; LACERDA-JÚNIOR, G. V.; DOS REIS JUNIOR, F. B.; FERNANDES-JÚNIOR, P. I.; MELO, I. S.; QUECINE, M. C. Beneficial plant-associated microorganisms from semiarid regions and seasonally dry environments: A review. **Frontiers in Microbiology**, 11, 553223, 2021.

BRAGA, A. P. A.; CRUZ, J. M.; DE MELO, I. S. Rhizobacteria from Brazilian semiarid biome as growth promoters of soybean (*Glycine max* L.) under low water availability. **Brazilian Journal of Microbiology**, 53(2), 873–883, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42770-022-00711-7>

BRILLI, F.; POLLASTRI, S.; RAIÓ, A.; BARALDI, R.; NERI, L.; BARTOLINI, P.; BALESTRINI, R. Root colonization by *Pseudomonas chlororaphis* primes tomato (*Lycopersicon esculentum*) plants for enhanced tolerance to water stress. **Journal of plant physiology**, 232, 82-93, 2019.

CESARI, A. B.; PAULUCCI, N. S.; LÓPEZ GÓMEZ, M.; HIDALGO- CASTELLANOS, J.; LLUCH PLÁ, C.; DARDANELLI, M. S. Performance of *Bradyrhizobium* and *Bradyrhizobium*–*Azospirillum* in alleviating the effects of water-restrictive conditions during the early stages of *Arachis hypogaea* growth. **Journal of Plant Growth Regulation**, 38, 1362-1374, 2019.

CHANDRA, D.; SRIVASTAVA, R.; GLICK, B. R.; SHARMA, A. K. Drought-tolerant *Pseudomonas* spp. improve the growth performance of finger millet *Eleusine coracana* (L.) Gaertn.) under non-stressed and drought-stressed conditions. **Pedosphere**, 28(2), 227-240, 2018.

CHANDRA, P.; WUNNAVA, A.; VERMA, P.; CHANDRA, A.; SHARMA, R. K. Strategies to mitigate the adverse effect of drought stress on crop plants— influences of soil bacteria: a review. **Pedosphere**, 31(3), 496-509, 2021.

COSTA SANTOS, C. M.; DE MATTOS PIMENTA, C. A.; AND NOBRE, M. R. The PICO strategy for the research question

construction and evidence search. **Revista Latino Americana de Enfermagem**. 15, 508–11, 2017.

ARAÚJO, P. V. L. V.; LIRA JUNIOR, M. A.; SOUZA JÚNIOR, V. S. D.; DE ARAÚJO FILHO, J. C.; CURY FRACETTO, F. J.; ANDREOTE, F. D.; DE ARAUJO PEREIRA, A. P.; MENDES JÚNIOR, J. P.; RÊGO BARROS, F. M. D.; MONTEIRO FRACETTO, G. G. Bacteria from tropical semiarid temporary ponds promote maize growth under hydric stress. **Microbiological Research**, 240, 126564, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126564>

DEL-CANTO, A.; SANZ-SAEZ, Á.; SILLERO-MARTÍNEZ, A.; MINTEGI, E.; LACUESTA, M. Selected indigenous drought tolerant rhizobium strains as promising biostimulants for common bean in Northern Spain. **Frontiers in Plant Science**, 14, 1046397, 2023. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1046397>

DELSHADI, S.; EBRAHIMI, M.; SHIRMOHAMMADI, E. Effectiveness of plant growth promoting rhizobacteria on *Bromus tomentellus* Boiss seed germination, growth and nutrients uptake under drought stress. **South African Journal of Botany**, 113, 11-18, 2017.

EIDA, A. A.; ZIEGLER, M.; LAFI, F. F.; MICHELL, C. T.; VOOLSTRA, C. R.; HIRT, H.; SAAD, M. M. Desert plant bacteria reveal host influence and beneficial plant growth properties. **PLOS ONE**, 13(12), e0208223, 2018. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208223>

GAMALERO, E.; GLICK, B. R. Recent advances in bacterial amelioration of plant drought and salt stress. **Biology**, 11(3), 437, 2022.

GAO, J.; LUO, Y.; WEI, Y.; HUANG, Y.; ZHANG, H.; HE, W.; ET AL. Screening of plant growth promoting bacteria (PGPB) from rhizosphere and bulk soil of *Caragana microphylla* in different habitats and their effects on the growth of *Arabidopsis* seedlings. *Biotechnol. Biotech. Eq.* 33, 921–930, 2019. doi: 10.1080/13102818.2019.1629841

GETAHUN, A.; MULETA, D.; ASSEFA, F.; KIROS, S. Plant Growth-Promoting Rhizobacteria Isolated from Degraded Habitat Enhance Drought Tolerance of *Acacia* (*Acacia abyssinica* Hochst. Ex Benth.) Seedlings. **International Journal of Microbiology**, 2020, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2020/8897998>

HNINI, M.; TAHA, K.; AURAG, J. Molecular identification and characterization of phytobeneficial osmotolerant endophytic bacteria inhabiting root nodules of the Saharan tree *Vachellia tortilis* subsp. *raddiana*. **Archives of Microbiology**, 205(1), 45, 2023.

Huang, X. F.; Zhou, D.; Lapsansky, E. R.; Reardon, K. F.; Guo, J.; Andales, M. J.; Manter, D. K. *Mitsuaria* sp. and *Burkholderia* sp. from *Arabidopsis* rhizosphere enhance drought tolerance in *Arabidopsis thaliana* and maize (*Zea mays* L.). **Plant and Soil**, 419, 523-539, 2017.

IGIEHON, N. O.; BABALOLA, O. O.; AREMU, B. R. Genomic insights into plant growth promoting rhizobia capable of enhancing soybean germination under drought stress. **BMC microbiology**, 19(1), 1-22, 2019.

JAIN, R.; SARAF, M. ACC deaminase producing PGPR modulates nutrients uptake, soil properties and growth of cluster bean (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) under deficit irrigation. **Biologia**, 1-14, 2023.

JORGE, G. L.; KISIALA, A.; MORRISON, E.; AOKI, M.; NOGUEIRA, A. P. O.; EMERY, R. N. Endosymbiotic *Methylobacterium oryzae* mitigates the impact of limited water availability in lentil (*Lens culinaris* Medik.) by increasing plant cytokinin levels. **Environmental and Experimental Botany**, 162, 525-540, 2019.

KANG, S. M.; RADHAKRISHNAN, R.; KHAN, A. L.; KIM, M. J.; PARK, J. M.; KIM, B. R.; LEE, I. J. Gibberellin secreting rhizobacterium, *Pseudomonas putida* H-2-3 modulates the hormonal and stress physiology of soybean to improve the plant growth under saline and drought conditions. **Plant Physiology and Biochemistry**, 84, 115-124, 2014.

KARIMZAD, L.; KHAKVAR, R.; YOUNESSI-HAMZEKHANLU, M.; NOROUZI, M.; AMANI, M.; SABOURMOGHADDAM, N. Drought tolerance induction in wheat by inoculation of seeds with a novel growth-promoting bacteria. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 47, 102594, 2023.

Kaymak, H. C. Potential of PGPR in agricultural innovations. **Plant growth and health promoting bacteria**, 45-79, 2011.

KOUR, D.; RANA, K. L.; SHEIKH, I.; KUMAR, V.; YADAV, A. N.; DHALIWAL, H. S.; SAXENA, A. K. Alleviation of drought stress and plant growth promotion by *Pseudomonas libanensis* EU-LWNA-33, a drought-adaptive phosphorus- solubilizing bacterium. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 90, 785-795, 2020.

KOZA, N. A.; ADEDAYO, A. A.; BABALOLA, O. O.; KAPPO, A. P. Microorganisms in plant growth and development: Roles in abiotic stress tolerance and secondary metabolites secretion. **Microorganisms**, 10(8), 1528, 2022.

KUMAR, M.; SHARMA, S.; GUPTA, S.; KUMAR, V. Mitigation of

abiotic stresses in *Lycopersicon esculentum* by endophytic bacteria. **Environmental sustainability**, 1, 71-80, 2018.

LALLOO, R.; MAHARAJH, D.; GÖRGENS, J.; GARDINER, N. A downstream process for production of a viable and stable *Bacillus cereus* aquaculture biological agent. **Applied Microbiology and Biotechnology**, 86, 499-508, 2010.

LIM, J.-H.; KIM, S.-D. Induction of Drought Stress Resistance by Multi-Functional PGPR *Bacillus licheniformis* K11 in Pepper. **The Plant Pathology Journal**, 29(2), 201–208, 2013. <https://doi.org/10.5423/PPJ.SI.02.2013.0021>

LIMA, G. B. P. D.; GOMES, E. F.; ROCHA, G. M. G. D.; SILVA, F. D. A.; FERNANDES, P. D.; MACHADO, A. P.; FERNANDES-JUNIOR, P. I.; MELO, A. S. D.; ARRIEL, N. H. C.; GONDIM, T. M. D. S.; LIMA, L. M. D. Bacilli Rhizobacteria as Biostimulants of Growth and Production of Sesame Cultivars under Water Deficit. **Plants**, 12(6),1337, 2023. <https://doi.org/10.3390/plants12061337>

LIU, F.; XING, S.; MA, H.; DU, Z.; MA, B. Cytokinin-producing, plant growth- promoting rhizobacteria that confer resistance to drought stress in *Platycladus orientalis* container seedlings. **Applied microbiology and biotechnology**, 97, 9155-9164, 2013.

LIU, J.; FIMOIGNARI, L.; DE ALMEIDA, J.; JENSEN, C. N. G.; COMPANT, S.; OLIVEIRA, T.; BAEUM, J.; PASTAR, M.; SESSITSCH, A.; MOELBAK, L.; LIU, F. Effect of *Bacillus paralicheniformis* on soybean (*Glycine max*) roots colonization, nutrient uptake and water use efficiency under drought stress. **Journal of Agronomy and Crop Science**, 209(4), 547–565, 2022. <https://doi.org/10.1111/jac.12639>

LOTFI, N.; SOLEIMANI, A.; ÇAKMAKÇI, R.; VAHDATI, K.; MOHAMMADI, P. (2022). Characterization of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) in Persian walnut associated with drought stress tolerance. **Scientific Reports**, 12(1), 12725, 2022.

MA, Y.; RAJKUMAR, M.; ZHANG, C.; FREITAS, H. Inoculation of *Brassica oxyrrhina* with plant growth promoting bacteria for the improvement of heavy metal phytoremediation under drought conditions. **Journal of hazardous materials**, 320, 36-44, 2016.

MAGANTI, H. B.; KIRKHAM, A. M.; BAILEY, A. J.; SHORR, R.; KEKRE, N.; PINEAULT, N.; ALLAN, D. S. Use of CRISPR/Cas9 gene editing to improve chimeric antigen-receptor T cell therapy: A systematic review and meta-analysis of preclinical studies. **Cytotherapy**, 24(4), 405-412, 2022.

MASSA, F.; DEFEZ, R.; BIANCO, C. Exploitation of plant growth promoting bacteria for sustainable agriculture: hierarchical approach

to link laboratory and field experiments. **Microorganisms**, 10(5), 865, 2022.

MENDOZA-LABRADOR, J.; ROMERO-PERDOMO, F.; ABRIL, J.; HERNÁNDEZ, J. P.; URIBE-VÉLEZ, D.; BUITRAGO, R. B. *Bacillus* strains immobilized in alginate macrobeads enhance drought stress adaptation of guinea grass. **Rhizosphere**, 19, 100385, 2021.

Mengual, C.; Schoebitz, M.; Caravaca, F.; Roldán, A. Assessment of the potential role of *Streptomyces* strains in the revegetation of semiarid sites: the relative incidence of strain origin and plantation site on plant performance and soil quality indicators. **Biology and Fertility of Soils**, 52, 53-64, 2016.

MORENO-GALVÁN, A., ROMERO-PERDOMO, F. A., ESTRADA-BONILLA, G., MENESES, C. H. S. G., & BONILLA, R. R. Dry-Caribbean *Bacillus* spp. Strains Ameliorate Drought Stress in Maize by a Strain-Specific Antioxidant Response Modulation. **Microorganisms**, 8(6), 823,2020.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms8060823>

NADERI, K.; ETESAMI, H.; ALIKHANI, H. A.; ARANI, A. M. Potential use of endophytic and rhizosphere bacteria from the desert plant *Stipagrostis pennata* as biostimulant against drought in wheat cultivars. **Rhizosphere**, 24, 100617, 2022.

NAKKEERAN, S.; FERNANDO, W.G.D.; SIDDIQUI, Z.A. Plant growth promoting rhizobacteria formulations and its scope in commercialization for the management of pests and diseases. In *PGPR: Biocontrol and Biofertilization*; Siddiqui, Z.A., Ed.; Springer: Dordrecht, **The Netherlands**, 2005; pp. 257–296.

NAVEED, M.; MITTER, B.; REICHENAUER, T. G.; WIECZOREK, K.; SESSITSCH, A. Increased drought stress resilience of maize through endophytic colonization by *Burkholderia phytofirmans* PsJN and *Enterobacter* sp. FD17. **Environmental and Experimental Botany**, 97, 30-39, 2014.

NIU, X.; SONG, L.; XIAO, Y.; GE, W. Drought-Tolerant Plant Growth-Promoting Rhizobacteria Associated with Foxtail Millet in a Semi-arid Agroecosystem and Their Potential in Alleviating Drought Stress. **Frontiers in Microbiology**, 8, 2580, 2018.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02580>

NIZA-COSTA, M.; RODRÍGUEZ-DOS SANTOS, A. S.; REBELO-ROMÃO, I.; FERRER, M. V.; SEQUERO LÓPEZ, C.; VÍLCHEZ, J. I. Geographically Disperse, Culturable Seed-Associated Microbiota in Forage Plants of Alfalfa (*Medicago sativa* L.) and Pitch Clover (*Bituminaria bituminosa* L.): Characterization of Beneficial Inherited Strains as Plant Stress-Tolerance Enhancers. **Biology**, 11(12),1838,

2022. <https://doi.org/10.3390/biology11121838>

PAGE, M.J.; MCKENZIE, J.E.; BOSSUYT, P.M.; BOUTRON, I.; HOFFMANN, T.C.; MULROW, C.D.; SHAMSEER, L.; TETZLAFF, J.M.; AKL, E.A.; BRENNAN, S.E. The PRISMA 2020 Statement: An Updated Guideline for Reporting Systematic Reviews. **BMJ** 2021, 372, n71.

PANDEY, V. P.; IRULAPPAN, M.V.; BAGAVATHIANNAN, M.; SENTHIL-KUMAR. Impact of combined abiotic and biotic stresses on plant growth and avenues for crop improvement by exploiting physio-morphological traits *Front. Plant Sci.*, 8, p. 537, 2017.

PATEL, P.; PATIL, T.; MAITI, S.; PAUL, D.; AMARESAN, N. Screening of osmotic stress-tolerant bacteria for plant growth promotion in wheat (*Triticum aestivum* L.) and brinjal (*Solanum melongena* L.) under drought conditions. **Letters in Applied Microbiology**, 75(5), 1286-1292, 2022.

PATEL, S.; JINAL, H. N.; AMARESAN, N. Isolation and characterization of drought resistance bacteria for plant growth promoting properties and their effect on chilli (*Capsicum annuum*) seedling under salt stress. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, 12, 85-89, 2017.

PIGGOT, P. J.; HILBERT, D. W. Sporulation of *Bacillus subtilis*. **Current opinion in microbiology**, 7(6), 579-586, 2004.

PRAVEEN KUMAR, G.; MIR HASSAN AHMED, S. K.; DESAI, S.; LEO DANIELAMALRAJ, E.; RASUL, A. *In vitro* screening for abiotic stress tolerance in potent biocontrol and plant growth promoting strains of *Pseudomonas* and *Bacillus* spp. **International Journal of Bacteriology**, 2014.

ROSTAMIAN, A.; MOAVENI, P.; MOZAFARI, H.; RAJABZADEH, F. Effective drought mitigation by rhizobacteria consortium in wheat field trials. *Rhizosphere*, 25, 100653, 2023.

SÁ, C.; CARDOSO, P.; FIGUEIRA, E. Alginate as a feature of osmotolerance differentiation among soil bacteria isolated from wild legumes growing in Portugal. **Science of the Total Environment**, 681, 312-319, 2019.

SALEEM, A. R.; BRUNETTI, C.; KHALID, A.; DELLA ROCCA, G.; RAI, A.; EMILIANI, G.; DE CARLO, A.; MAHMOOD, T.; CENTRITTO, M. Drought response of *Mucuna pruriens* (L.) DC. inoculated with ACC deaminase and IAA producing rhizobacteria. **PLOS ONE**, 13(2), e0191218, 2018.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191218>

SANTANA, S. R. A.; VOLTOLINI, T. V.; ANTUNES, G. D. R.; DA SILVA, V. M.; SIMÕES, W. L.; MORGANTE, C. V.; DE FREITAS, A.

D. S.; CHAVES, A. R. D. M.; AIDAR, S. D. T.; FERNANDES-JÚNIOR, P. I. Inoculation of plant growth- promoting bacteria attenuates the negative effects of drought on sorghum. **Archives of Microbiology**, 202(5), 1015–1024, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00203-020-01810-5>

SELIM, S.; HASSAN, Y. M.; SALEH, A. M.; HABEED, T. H.; ABDELGAWAD, H. Actinobacterium isolated from a semi-arid environment improves the drought tolerance in maize (*Zea mays* L.). **Plant Physiology and Biochemistry**, 142, 15-21, 2019.

SKZ, A.; VARDHARAJULA, S.; VURUKONDA, S. S. K. P. Transcriptomic profiling of maize (*Zea mays* L.) seedlings in response to *Pseudomonas putida* strain FBKV2 inoculation under drought stress. **Annals of Microbiology**, 68, 331-349, 2019.

SUVALA, S. D.; FATIMA, S.; PEDDI, R. Bioprospecting Indigenous Drought Mitigating and Plant Growth-promoting Isolates for Chickpea Cultivation in Telangana, A Semi-Arid Region. **Biopesticides International**, 15(2), 2019.

TANVEER, S.; AKHTAR, N.; ILYAS, N.; SAYYED, R. Z.; FITRIATIN, B. N.; PERVEEN, K.; BUKHARI, N. A. Interactive effects of *Pseudomonas putida* and salicylic acid for mitigating drought tolerance in canola (*Brassica napus* L.). **Heliyon**, 9(3), 2023.

VARGAS, R.; KENNEY, A. M.; BILINSKI, T. Variable Influences of Water Availability and Rhizobacteria on the Growth of *Schizachyrium scoparium* (Little Bluestem) at Different Ages. **Frontiers in Microbiology**, 10, 860, 2019. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00860>

VAUGHAN, M. M.; BLOCK, A.; CHRISTENSEN, S. A.; ALLEN, L. H.; SCHMELZ, E. A. The effects of climate change associated abiotic stresses on maize phytochemical defenses. **Phytochemistry Reviews**, 17(1), 37-49, 2018.

VEJAN, P.; ABDULLAH, R.; KHADIRAN, T.; ISMAIL, S.; NASRULHAQ BOYCE, A. (2016). Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability—a review. **Molecules**, 21(5), 573, 2016.

VISHNUPRADEEP, R.; BRUNO, L. B.; TAJ, Z., KARTHIK, C.; CHALLABATHULA, D.; TRIPTI; KUMAR, A.; FREITAS, H.; RAJKUMAR, M. Plant growth promoting bacteria improve growth and phytostabilization potential of *Zea mays* under chromium and drought stress by altering photosynthetic and antioxidant responses. **Environmental Technology & Innovation**, 25, 102154, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102154>

VURUKONDA, S. S. K. P.; VARDHARAJULA, S.; SHRIVASTAVA,

M.; SKZ, A. (2016). Multifunctional *Pseudomonas putida* strain FBKV2 from arid rhizosphere soil and its growth promotional effects on maize under drought stress. **Rhizosphere**, 1, 4-13, 2016.

WARRAD, M.; HASSAN, Y. M.; MOHAMED, M. S. M.; HAGAGY, N.; AL- MAGHRABI, O. A.; SELIM, S.; SALEH, A. M.; ABDELGAWAD, H. A Bioactive Fraction from *Streptomyces* sp. Enhances Maize Tolerance against Drought Stress. **Journal of Microbiology and Biotechnology**, 30(8), 1156–1168, 2020. <https://doi.org/10.4014/jmb.2003.03034>

WIDNYANA, I.; KETUT; COKORDA JAVANDIRA. Activities *Pseudomonas* spp. and *Bacillus* sp. to stimulate germination and seedling growth of tomato plants." **Agriculture and Agricultural Science Procedia** 9 (2016): 419-423.

XIE, Z.; CHU, Y.; ZHANG, W.; LANG, D.; ZHANG, X. *Bacillus pumilus* alleviates drought stress and increases metabolite accumulation in *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. **Environmental and experimental botany**, 158, 99-106, 2019.

ZHANG, M.; YANG, L.; HAO, R.; BAI, X.; WANG, Y.; YU, X. Drought-tolerant plant growth-promoting rhizobacteria isolated from jujube (*Ziziphus jujuba*) and their potential to enhance drought tolerance. **Plant and Soil**, 452, 423-440, 2020.

Bactérias promotoras de crescimento como bioestimulantes na nutrição de mudas de *Agave sisalana* micropropagadas *in vitro*

Resumo: A disponibilidade de mudas de sisal com qualidade fitossanitária e nutricional é um dos entraves para a sustentabilidade e expansão dessa cultura, sendo a propagação *in vitro* uma alternativa. Considerando o potencial de bactérias diazotróficas em promover o melhor crescimento e nutrição de plantas, foram realizados três experimentos com o objetivo de avaliar os isolados de bactérias diazotróficas no crescimento e na nutrição de mudas de sisal após a propagação *in vitro*. Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação: experimento 1) mudas micropropagadas a partir de rebentos como explante de partida; 2) mudas micropropagadas a partir de bulbilhos como explante de partida; 3) mudas oriundas de bulbilhos coletados de plantas de sisal no campo. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 x 7, sendo dois períodos de avaliação (150 e 300 dias após o transplante das mudas - DAP) e sete tratamentos: inoculação das mudas com *Rhizobium calliandrae* (ESA 118), *Paenibacillus* sp. (ESA 601), *Bacillus subtilis* (ESA 599), dois isolados de *Azospirillum brasilense* (UFRB FA34C2-2 e Ab-V5) e dois controles sem inoculação, com e sem adubação nitrogenada. As características de crescimento e o acúmulo de nutrientes foliar foram avaliados. Houve aumento das características de crescimento das plantas de sisal com aplicação de 240 mg/vaso de nitrogênio aos 150 DAP, em todos os experimentos, se deve ao rápido fornecimento de nitrogênio pela adubação mineral, que se encontra prontamente disponível para absorção pelas plantas. Na avaliação aos 300 DAP, a inoculação com as estirpes de *A. brasilense* UFRB FA34C2-2 e Ab-V5 promoveram aumento na área foliar e massa da matéria seca da parte em média de 66,4% e 79,9% nas mudas micropropagadas oriundas de bulbilho, respectivamente, quando comparadas com mudas micropropagadas oriundas de rebento do tratamento com nitrogênio mineral. É benéfica a inoculação de mudas de sisal propagadas *in vitro* ou por bulbilhos de campo, com bactérias diazotróficas, o que pode promover o melhor estabelecimento das plantas no campo.

Palavras-chave: *Rhizobium*; *Paenibacillus*; *Bacillus*; *Azospirillum*; Inoculação

Growth promoting bacteria as biostimulants in the nutrition of micropropagated *Agave sisalana* seedlings

Abstract: Sisal (*Agave sisalana*) is cultivated in the semi-arid region of Bahia, Brazil, mainly by family farmers, to extract the main hard fiber sold nationally and internationally. The availability of seedlings with phytosanitary and nutritional quality is one of the obstacles to the sustainability and expansion of this culture, with *in vitro* propagation being an alternative. Considering the potential of diazotrophic bacteria to promote better plant growth and nutrition, three experiments were carried out with the aim of evaluating diazotrophic bacteria isolates on the growth and nutrition of sisal seedlings after *in vitro* propagation. The experiments were conducted in a greenhouse: experiment 1) micropropagated seedlings from shoots as starting explant; 2) micropropagated seedlings from bulbils as a starting explant; 3) seedlings from bulbils collected from sisal plants in the field. The experimental design was completely randomized, in a 2 x 7 factorial scheme, with two evaluation periods (150 and 300 days after seedling transplantation - DAP) and seven treatments: inoculation of seedlings with *Rhizobium calliandrae* (ESA 118), *Paenibacillus* sp. (ESA 601), *Bacillus subtilis* (ESA 599), two isolates of *Azospirillum brasilense* (UFRB FA34C2-2 and Ab-V5) and two controls without inoculation, with and without nitrogen fertilization. Growth characteristics and leaf nutrient accumulation were evaluated. In the evaluation at 300 DAP, inoculation with the strains of *A. brasilense* UFRB FA34C2-2 and Ab-V5 promoted an increase in leaf area and dry matter mass of the part by an average of 66.4% and 79.9% in micropropagated seedlings originating from bulbils, respectively, when compared with micropropagated seedlings originating from sprouts from treatment with mineral nitrogen. It is beneficial to inoculate sisal seedlings propagated *in vitro* or by field bulbs with diazotrophic bacteria, which can promote better plant establishment in the field.

Keywords: Sisal.; Biological nitrogen fixation.; Plant growth promotion.; Acclimatization of micropropagated plants.; Vegetable nutrition.

1.0 INTRODUÇÃO

O sisal (*Agave sisalana* Perrine) é uma cultura perene, cultivada para extração da principal fibra dura e natural comercializada no cenário mundial (RIBEIRO et al., 2015; FAO, 2024). A fibra é utilizada na fabricação de cordas, fios, tapetes, artesanato, na construção civil e em compósitos na indústria automotiva (NAVA-CRUZ et al., 2015; FAO, 2024). Os resíduos resultantes da extração das fibras podem ser utilizados como fertilizantes, rações para animal ou para fins terapêuticos (FARIA et al., 2008; VIEL et al., 2017; CARMO et al., 2021).

Estudos apontam para a eficiência no uso do sisal para matéria-prima para biocombustíveis (ESCAMILLA-TREVINO LL, 2012; YANG et al., 2015; DAVIS et al., 2017). Essa planta também é usada como fonte de compostos farmacêuticos (CHEN et al., 2009; DEBNAT et al., 2010; SHAHZAD et al., 2022), possui propriedades inseticidas (SOUSA et al., 2014), antimicrobianas (SANTOS et al 2015; DAMASCENO et al., 2015) e nematocidas (JESUS et al., 2014; SOUZA et al., 2021).

No Brasil, a cultura do sisal passou a ser explorada comercialmente a partir da década de 1940, concentrando-se na Região Nordeste (CÂNDIDO FILHO; SIQUEIRA; ARAÚJO, 2018). A agavecultura ocupa uma extensa área de solos pobres na região semiárida do Nordeste brasileiro, que é afetada por condições climáticas extremas de irregularidades pluviométricas, o que compromete drasticamente as atividades agrícolas e pecuárias. O Estado da Bahia se destaca com aproximadamente 94,5% da produção de sisal no Brasil (IBGE, 2023). No entanto, tem-se observado uma queda de produtividade e área plantada, com 93.756 ha, e produção de 98, 4 mil toneladas, com produtividade média de 869 kg ha⁻¹ em 2022 (FAO, 2024).

A expansão da cultura foi maior na região semiárida da Bahia, especificamente no Território do sisal e a região de Piemonte da

Diamantina e Chapada Diamantina, que produzem 93% do sisal nacional (VUORINNE et al., 2021).

Entretanto, tem-se observado um declínio na produção de sisal, nas últimas duas décadas, devido a problemas relacionados à podridão vermelha causada por *Aspergillus welwitschiae*, o principal problema fitossanitário da cultura no Brasil (DUARTE et al., 2018), aos problemas com a comercialização da fibra, às condições climáticas adversas, à falta de investimento na modernização agrícola, no manejo de água e solo, falta de variedades mais produtivas (CARNEIRO et al., 2014; SOARES et al., 2020) e de mudas com qualidade genética, nutricional e fitossanitária (SOARES et al., 2020).

O incremento no uso de tecnologias na produção em campo, aumento da área plantada e o melhor processamento da fibra, com maior qualidade, pode favorecer a comercialização e renda para o território. Dessa forma, contribui para a exportação do produto para os Estados Unidos, China e Portugal, principais compradores da fibra (CONAB, 2024).

Como forma de minimizar tais problemas, tem-se recorrido à biotecnologia, em especial ao uso da técnica da micropropagação via embriogênese somática, que é amplamente utilizada com o objetivo de produzirem mudas em larga escala e com uniformidade e qualidade fitossanitária (BALDOTTO et al., 2010; CARNEIRO et al., 2014; SILVA et al., 2016; FONSECA et al., 2020).

A técnica da micropropagação *in vitro* apresenta possibilidade de produção de mudas em larga escala e livres de doenças (Carneiro et al., 2014). No processo de produção massal de plantas por propagação *in vitro* é necessário um período de aclimação até que as plantas consigam se adaptar às condições ambientais de cultivo pós-*in vitro* e atinjam um tamanho que seja considerado ideal para o transplante para campo (BALDOTTO et al., 2010).

No processo de aclimação, como as plantas saem da condição *in vitro* livres de microorganismos, torna-se vantajoso a inoculação com microorganismos promotores de crescimento vegetal, a exemplo das bactérias diazotróficas. Essas bactérias, quando introduzidas na

fase *ex vitro*, podem promover o crescimento das plantas, interferindo nas etapas de indução e diferenciação do sistema radicular (BALDOTTO et al., 2010; SILVA et al., 2016; TAIZ e ZEIGER, 2017), no aumento da massa das raízes, além do potencial de promoverem a proteção contra fitopatógenos, quando transplantadas para o campo (SILVA et al., 2016; FUKAMI et al. 2017; FUKAMI, CERZINI e HUNGRIA, 2018).

As bactérias diazotróficas podem promover o crescimento vegetal através de diversos mecanismos, como a fixação biológica de nitrogênio, a produção de fito hormônios, em especial do ácido Indol-acético (IAA) e da enzima ACC deaminase, a solubilização de nutrientes no solo, a exemplo do fosfato, o controle biológico e indução de resistência sistêmica a patógenos (LAVACA et al., 2008; FUKIMI, CERZINI e HUNGRIA, 2018; COELHO et al., 2019). Essas bactérias contribuem para a obtenção de plantas mais homogêneas e tolerantes a estresse bióticos e abióticos (KAVAMURA et al., 2013; ANDRADE et al., 2016; SANTOS et al., 2020; SOUZA et al., 2021).

Um número crescente de estudos tem demonstrado que a inoculação com bactérias associativas promove o crescimento vegetal e incrementos no acúmulo de nutrientes em várias culturas de importância econômica, como por exemplo em *Fragaria ananassa* (ANDRADE et al., 2019), *Cichorium intybus* (BRAULIO et al., 2020), *Oryza Sativa* (ARAUJO et al., 2021), *Glycine max* (BUSO et al., 2021), *Zea mays* (NASCIMENTO et al., 2021) e *Cicer arietinum* (ALMEIDA Neta et al., 2021).

Referente as bactérias, *Azospirillum brasilense* (Ab-V5), *Rhizobium calliandrae* (ESA 118), *Paenibacillus* sp. (ESA 601) e *Bacillus subtilis* (ESA 599) são relatadas como sendo promotoras de crescimento, contribuindo com o aumento da biomassa e melhoria da nutrição vegetal de plantas não leguminosa (NASCIMENTO et al., 2021). Esses autores obtiveram respostas significativas nas características agrônômicas e no acúmulo de nitrogênio de plantas de milho inoculadas com as estirpes ESA 599 (*Bacillus spp.*), ESA 601 (*Paenibacillus sp.*) e Ab-V5 (*Azospirillum brasilense*).

Em leguminosas, a estirpe UFRB FA34C2-2 (SOUZA, 2017) vem sendo avaliada no cultivo de feijão-caupi (BRAULIO et al., 2021), mas também mostrou potencial para substituir a adubação nitrogenada no cultivo de almeirão (BRAULIO et al., 2020).

Em Agaves, Jarquín-Rosales et al., (2023) demonstram um efeito benéfico da inoculação de mudas oriundas de bulbilhos de *Agave angustifolia*, com *Azospirillum brasiliense*, estirpe obtida da empresa MaxiFer®, em especial para a brotação de folhas novas e taxa de crescimento para altura das plantas, em substrato composto por 50% esterco bovino e 50% areia e adubado com solução nutritiva completa e irrigação, uma vez por semana, por um período de um ano. Torre-Ruíz et al, (2016) demonstram um efeito benéfico das bactérias nativas *Rhizobium daejeonense*, *Acinetobacter calcoaceticus* e *Pseudomonas mosselii*, isoladas da rizosfera de *A. americana*, no crescimento e produção de frutanos, que são polímeros da frutose, em mudas da mesma espécie de Agave.

Em *Agave putatorum*, Bautista-Cruz e Martínez-Gallegos (2020) relataram efeitos benéficos significativos no crescimento de mudas com *Burkholderia cepacia*, *Flavobacterium sp.*, *Paenibacillus amylolyticus*. Molina et al., (2021) obtiveram 235 isolados de rizobactérias de *Agave americana* e demonstraram a produção de ácido índole acético, solubilização de fosfato, produção de ACC diaminase e de sideróforos e fixação biológica de nitrogênio, concluindo que essas rizobactérias tem potencial de promoção de crescimento. Estudos têm demonstrado a presença de bactérias diazotróficas em solos e em diferentes partes de plantas de sisal (SANTOS et al.,2019).

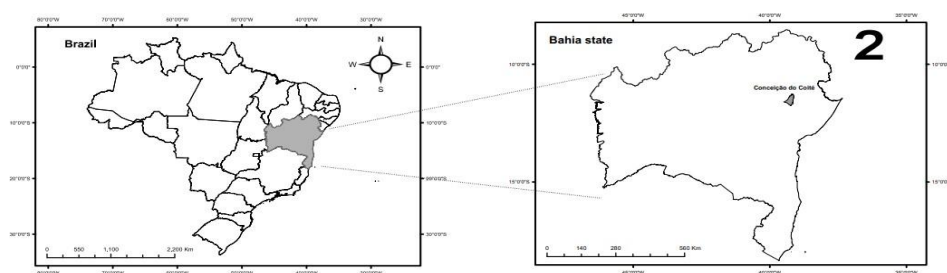
Em *Agave sisalana* (sisal), Santos et al., (2019) isolaram bactérias do gênero *Pantoea*, *Rhizobium*, *Burkholderia*, *Leifsonia* e *Bacillus* e todas apresentaram características bioquímicas de promoção de crescimento e tolerância a estresses abióticos e promoveram o crescimento em plantas de pepino (*Cucumis sativus*). Entretanto, essas bactérias não foram avaliadas para a promoção de crescimento no sisal.

Considerando o potencial de promoção de crescimento e de indução de tolerância a estresses bióticos e abióticos, o que poderá trazer benefícios significativos na fase de aclimatação e crescimento de mudas micropropagadas *in vitro* de sisal, este estudo avaliou bactérias diazotróficas com efeito de promoção de crescimento comprovado na cultura do milho, na promoção do crescimento e nutrição de mudas de sisal produzidas *in vitro* e oriundas de diferentes explantes.

2.0 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação do Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas (CCAAB) na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), localizado no município de Cruz das Almas – BA (latitude 12°40'19"S e longitude 39°06'23"O). Durante a condução dos experimentos, a temperatura interna na casa de vegetação foi de $30,3 \pm 0,8$ °C.

Figura 1: Locais de amostragem e mapa da área de cultivo do sisal na Bahia. No mapa principal da esquerda para direita está a cidade de Conceição do Coité que faz parte do território do Sisal.



2.1 Desenho experimental e estirpes de bactérias diazotróficas

Foram realizados três experimentos, sendo: experimento I) com mudas micropropagadas *in vitro*, com explantes oriundos de rebentos de sisal coletados em áreas de produção de sisal no semiárido da

Bahia; experimento II) com mudas micropropagadas *in vitro*, com explantes oriundos de bulbilho de sisal coletados em campos de sisal na Bahia e experimento III) com mudas oriundas de bulbilhos coletados em área de produção de sisal na região de Valente, Bahia.

O experimento foi instalado no delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 3 x 7, 3 tipos de mudas (rebento micropropagado, bulbilho micropropagado e bulbilho de campo) e 7 tratamentos (f234c22, Ab-V5, ESA 599, ESA 601, cn, ESA 118 e sn), com 5 repetições.

cinco estirpes de bactérias diazotróficas onde 4 foram provenientes da Coleção de Microrganismos de Interesse Agrícola da Embrapa Semiárido (CMISA): As estirpes *Rhizobium calliandrae* ESA 118, *Paenibacillus* sp., ESA 601, *Bacillus subtilis* ESA 599 foram provenientes da Coleção de Microrganismos de Interesse Agrícola da Embrapa Semiárido (CMISA) e a *Azospirillum brasilense* Ab-V5, isolada por Hungria et al, (2010) e autorizada para uso na cultura do milho pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), a estirpe f234c22 foi isolada por SOUZA, 2017.

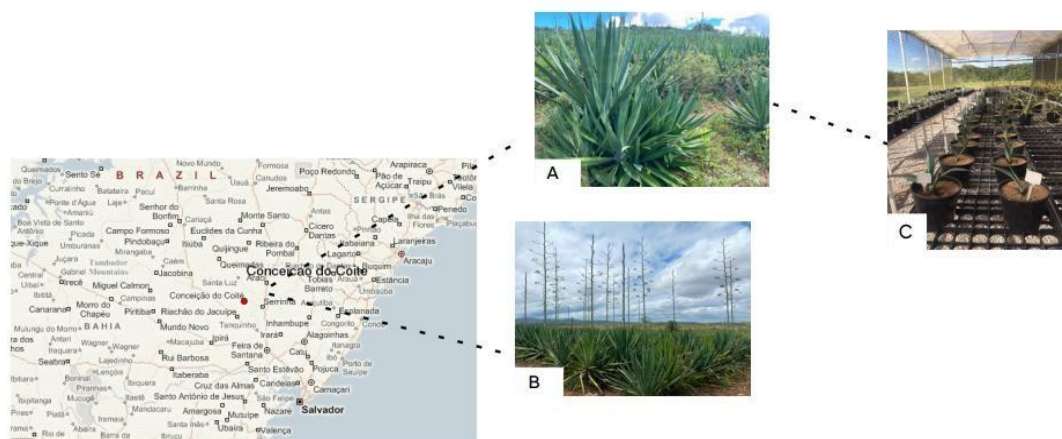
A identificação taxonômica das bactérias diazotróficas está disponível em Nascimento et al. (2021). Os inoculantes foram preparados com o cultivo dos isolados no meio de cultura Dyg's líquido por 4 (quatro) dias, a 25 °C, com agitação orbital a 120 rpm, obtendo-se a fase log de crescimento, com 10^8 UFC mL⁻¹.

2.2 Material vegetal e estabelecimento *in vitro*

As plantas micropropagadas *in vitro* foram oriundas de rebentos e bulbilhos de sisal da região de Valente, Bahia. O meio de cultura utilizado foi o MS (Murashige e Skoog, 1962) com a metade das concentrações dos sais (MS 1\2), suplementado com o regulador de crescimento BAP (6-benzilaminopurina) na concentração de 53,28 µM, adicionado 87,0 mM sacarose e solidificado com 0,7% de ágar, segundo o protocolo de Garcia et al. (2015). A fase de multiplicação

foi constituída de cinco ciclos de subcultivos no período de 60 dias (TAVARES, 2020).

Figura 2: Amostragem do local onde foram retiradas plantas de sisal



para micropropagação in vitro. (A) mudas oriundas do rebento. (B) mudas oriundas do bulbilho. (C) Mudas micropropagadas em casa de vegetação.

2.3 Preparo do substrato e inoculação das plântulas

Após o período de multiplicação *in vitro* foram selecionadas plântulas com aproximadamente 1,9 g de matéria fresca, sendo estas transferidas para tubetes com substrato e mantidas em casa de vegetação, conforme descrito a seguir. O substrato foi preparado com amostra de um Latossolo Amarelo distrocoeso, coletado no campus da UFRB, a 0,20 m de profundidade, acrescido de composto orgânico na proporção de (3:1). O composto orgânico foi produzido na UFRB, a partir de resíduos de poda de jardinagem acrescidos de esterco caprino e bovino. Os tubetes de 180 cm³ foram preenchidos com substrato constituído por: composto orgânico (30%) e Latossolo Amarelo distrocoeso (70%). O solo e o composto orgânico foram secos ao ar, destorroados, tamizados em peneira com malha de 5 mm e distribuídos nos tubetes.

O solo apresentou a seguinte caracterização química e física: pH (H₂O): 6,0; MO: 12,8 g dm⁻³, P (Mehlich-1): 10,5 mg dm⁻³, K⁺:

67,7 mg dm⁻³, Ca²⁺: 0,7 cmolc dm⁻³, Mg²⁺: 0,3 cmolc dm⁻³, (H+Al): 2,0 cmolc dm⁻³, SB: 1,2 cmolc dm⁻³, CTC efetiva: 1,2 cmolc dm⁻³, CTC potencial: 3,2 cmolc dm⁻³, V: 37,5%, Zn²⁺: 5,05 mg dm⁻³, Fe²⁺: 49,05 mg dm⁻³, Mn²⁺: 9,1 mg dm⁻³, Cu²⁺ :1,6 mg dm⁻³ e B: 0,28 mg dm⁻³; Areia: 533g kg⁻¹; Silte: 280 g kg⁻¹; Argila: 182g kg⁻¹. A característica química do composto orgânico está descrita na Tabela 1.

Por ocasião da transferência para os tubetes, o substrato foi umedecido até próximo da capacidade máxima de retenção de água de forma a assegurar boa umidade. No momento do transplante, cada plântula foi inoculada, utilizando uma pipeta Pasteur, colocando próximo as raízes, uma solução com 2 mL a partir das suspensões com isolados das bactérias diazotróficas (10⁸ UFC mL⁻¹) em meio líquido Dyg's, por tubete. Nos controles sem inoculação, foram adicionados 2 mL do meio de cultura Dyg's líquido, sem inóculo.

2.4 Condução do experimento e análises de crescimento

As plântulas nos tubetes foram aclimatadas em telado com tela de sombreamento de 30% na parte superior e nas laterais e irrigação por aspersão automatizada. O período de irrigação foi de 10 minutos por dia, em dias alternados, com lâmina d'água de 2,0 mm. As plantas permaneceram em tubetes na casa de vegetação por 150 dias, e após esse período, cinco plantas de cada tratamento foram avaliadas quanto ao número de folhas (NF), largura da folha (LF), altura da parte aérea (H), diâmetro do pseudocaule (DP), área foliar (AF), massa da matéria seca da parte aérea (MSPA), massa da matéria seca da raiz (MSR) e massa da matéria seca total (MST). Após 150 dias, as plantas foram transferidas para vasos de 4,0 dm³ preenchidos com Latossolo Amarelo distrocoeso e foram reinoculadas (2 mL das suspensões bacterianas aplicadas no solo em volta da planta) e adubadas com ureia (240 mg/vaso de N) de forma parcelada sendo 120 mg/vaso no momento do transplante e o restante 30 dias após.

A segunda avaliação foi realizada após 150 dias das plantas em vaso (total de 300 dias após o transplante da fase *in vitro*). Foram avaliados os pigmentos fotossintéticos *a*, *b* e total (CLA, CLB e CLT), NF, LF, H, DP, AF. Posteriormente, as plantas foram lavadas e separadas a parte aérea e radicular, as quais foram secas em estufa de circulação de ar forçado a uma temperatura de 65°C e posteriormente foi quantificada a massa da matéria seca da parte aérea (MSPA), radicular (MSR) e total (MST). A determinação da massa da matéria seca foi realizada em balança eletrônica, após secagem em estufa de ventilação forçada a 104 °C, por 3 dias e a altura da planta foi mensurada com régua graduada, com a medição feita da base do pseudocaule até ao ápice da planta, na emergência da última folha. O diâmetro do pseudocaule (DP) foi medido com um paquímetro (medido na base do pseudocaule). O índice de clorofila foi determinado usando clorofilômetro eletrônico (clorofiLOG CFL 1030 Falker) e a AF por meio de um medidor de área foliar (LI – 3100, Área Meter, Li-Cor., Inc., Lincoln, 87 Nebraska, USA).

2.5 Análise nutrição foliar

Após a secagem, as folhas de sisal foram moídas em moinho do tipo Willey com peneiras de 40 mesh e o material vegetal foi digerido por digestão sulfúrica, conforme Tedesco et al. (1985). Foram determinados os teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg). O N foi determinado pelo método micro Kjeldahl (digestão sulfúrica), o P foi determinado por colorimetria do metavanadato, o K foi por fotometria de emissão de chama e o Ca e Mg por espectrofotometria de absorção atômica (Malavolta; Vitti; Oliveira, 1997).

2.6 Análises Estatísticas

Os dados foram submetidos ao teste F da análise de variância. As médias dos tipos de mudas foram comparados pelo teste de Tukey

a 5% de probabilidade e as médias dos tratamentos foram agrupados pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

As análises foram realizadas com auxílio do programa estatístico R (R Core Team, 2025).

3.0 RESULTADOS

A análise de variância (ANAVA) indicou efeito significativo ($p < 0,01$) do tipo de muda de *Agave sisalana* e dos tratamentos, bem como da interação tipo de muda x tratamento, para todas as variáveis área foliar (AF), massa de matéria seca da parte aérea (MSPA), clorofila a (CLA), clorofila b (CLB), clorofila total (CLT), teores foliares de nitrogênio (N) e fósforo (P), diâmetro do pseudocaule (DP), altura da parte aérea (H), massa de matéria seca das raízes (MSR) e massa de matéria seca total (MST) (Tabela 1). A significância da interação evidencia que a resposta das plantas depende da combinação entre o material propagativo e o manejo aplicado. Os coeficientes de variação (CV%) foram baixos a muito baixos, confirmando elevada precisão experimental, tornando as comparações de médias confiáveis e pouco sensíveis à variação residual.

Tabela 1. Resumo da ANAVA de variáveis de plantas de *Agave salinas* sob efeito do tipo de muda e tratamentos.

FV	GL	Quadrados médios										
		AF	MSPA	cla	clb	clt	N	P	DP	H	MSR	MST
Tipo de muda	2	13221,00*	193,00**	328,60*	368,30**	1334,00**	362,50*	2,3 5**	3,45**	242,70**	543,60**	1330,00**
Tratamentos	6	28983,83*	11498,33**	1331,83**	266,70**	2752,50**	1678,50*	7,4 6**	11,82**	814,67**	648,58**	17474,00*
Tipo de muda x Trat.	12	3091,92**	181,33**	49,94**	81,72**	217,17**	38,25**	0,9 3**	0,25**	95,12**	27,98**	223,67**
Resíduo	84	32,75	1,58	6,60	2,78	9,93	3,69	0,0 8	0,10	1,22	0,21	1,69
CV (%)		5,62	1,99	8,46	12,52	7,22	5,84	10, 89	8,24	4,03	2,39	1,58

** significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

Para altura da parte área (H) na comparação intratratamento ($p < 0,05$), observaram-se que em Ab-V5 e UFRB FA34C2-2 o rebento micropropagado apresentou as maiores alturas (38,27 e 39,21 cm planta⁻¹), superando ambos os bulbilhos, em fertilização com N mineral (CN) ocorreu o inverso, com bulbilho de campo e bulbilho micropropagado semelhantes e superiores ao rebento (30-32 e 21,66 cm planta⁻¹) (Tabela 2). Em ESA 599, bulbilho micropropagado e rebento foram equivalentes e maiores que o bulbilho de campo (37,83 e 27,94 cm planta⁻¹), em ESA 601, o bulbilho micropropagado foi superior, seguido do rebento e, por último, do bulbilho de campo com H de 31,24, 28,42 e 18,42 cm planta⁻¹, respectivamente. Em ESA 118 não houve diferença entre tipos de mudas, e no tratamento sem inoculação e sem adubação com N mineral (SN) o bulbilho micropropagado superou os demais com 21,64 cm planta⁻¹.

Considerando os tratamentos dentro de cada tipo de muda, o bulbilho de campo apresentou valores médios superior com Ab-V5, CN e UFRB FA34C2-2 (29-31 cm planta⁻¹), nível intermediário com ESA 599 e menores valores com ESA 601 e ESA 118, sendo SN o tratamento com pior desempenho (Tabela 2). No bulbilho micropropagado, o destaque foi ESA 599 (37,83 cm planta⁻¹), seguido por UFRB FA34C2-2 (35,22 cm planta⁻¹), os tratamentos Ab-V5, CN e ESA 601 apresentaram valores médios intermediário, enquanto SN e ESA 118 registraram as menores alturas. Entre os rebentos micropropagados, UFRB FA34C2-2, Ab-V5 e ESA 599 compuseram os valores médios superiores (38-39 cm planta⁻¹), ESA 601 foi intermediário (28,42 cm planta⁻¹) e CN, ESA 118 e SN foram inferiores.

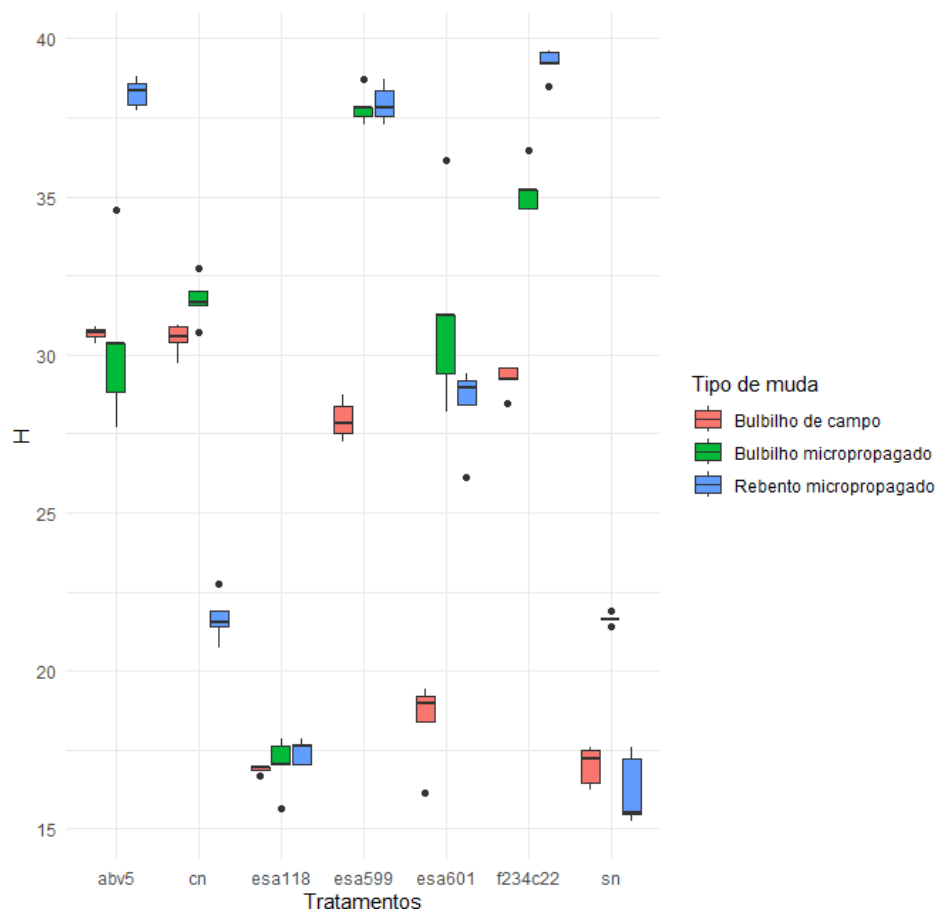
Tabela 2. Valores médios para altura da parte aérea (H) de mudas de *Agave sisalana*.

Tratamentos	Bulbilho de campo	Bulbilho micropropagado	Rebento micropropagado
Ab-V5	30,67 aB	30,37 cB	38,27 aA
CN	30,50 aA	31,74 cA	21,66 cB
ESA 118	16,87 cA	17,06 eA	17,45 dA
ESA 599	27,94 bB	37,83 aA	37,94 aA
ESA 601	18,42 cC	31,24 cA	28,42 bB
UFRB			
FA34C2- 2	29,21 aC	35,22 bB	39,21 aA
SN	17,00 cB	21,64 dA	16,20 dB

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e pelas mesmas letras minúsculas nas colunas pertencem ao mesmo grupo pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

O Box-plot indica que, em Ab-V5 e UFRB FA34C2-2 os rebentos micropropagados apresentam as maiores H (38-39 cm planta⁻¹), superando os bulbilhos, já em CN ocorre o inverso, com bulbilho de campo e bulbilho micropropagado (30-32 cm planta⁻¹) acima dos rebentos (22 cm planta⁻¹) (Figura 4). Em ESA 599, bulbilho micropropagado e rebento são ambos elevados (38 cm planta⁻¹) e superiores ao bulbilho de campo (28 cm planta⁻¹). Em ESA 601, observa-se bulbilho micropropagado > rebento > bulbilho de campo (31 > 29 > 19 cm planta⁻¹). O tratamento ESA 118 resulta em baixas alturas e sem diferenças entre tipos (16-18 cm planta⁻¹), e em SN o bulbilho micropropagado é ligeiramente superior (22 cm planta⁻¹) aos demais (16-17 cm planta⁻¹). A dispersão é geralmente pequena, sugerindo boa precisão.

Figura 4. Box-plot para altura (H) de mudas de *Agave sisalana*.



Na área foliar (AF) apresentou resposta claramente dependente da combinação entre tipo de muda e tratamento ($p < 0,05$) (Tabela 3). Os rebentos micropropagados foram superiores aos demais tipos de mudas em UFRB FA34C2-2 ($199,16 \text{ cm}^2 \text{ planta}^{-1}$), AB-V5 ($186,88 \text{ cm}^2 \text{ planta}^{-1}$) e ESA 601 ($179,03 \text{ cm}^2 \text{ planta}^{-1}$), em ESA 601, o rebento também superou os bulbilhos ($131,24$ e $82,49-74,42 \text{ cm}^2 \text{ planta}^{-1}$). Em CN, porém, o rebento foi inferior em relação aos bulbilhos de campo e micropropagado, e em ESA 118 não diferiu do bulbilho de campo, ambos acima do bulbilho micropropagado. No tratamento SN, não houve diferença entre tipos de mudas.

Para os tratamentos dentro de cada tipo de muda, o bulbilho de campo teve maior AF em UFRB FA34C2-2 ($141,57 \text{ cm}^2 \text{ planta}^{-1}$) e AB-V5 ($130,72$

cm²planta⁻¹), seguido por ESA 599 e CN (Tabela 3). Os tratamentos ESA 601, ESA 118 e SN apresentaram menores médias. Para o bulbilho micropropagado, os tratamentos com médias superiores foram AB-V5 (117,40 cm² planta⁻¹), ESA 599 (112,80 cm²), UFRB FA34C2-2 (109,50 cm² planta⁻¹) e CN (107,49 cm²), enquanto ESA 601 foi intermediário, e SN e ESA 118 os inferiores. Entre os rebentos micropropagados, destacou-se UFRB F23C42-2 (199,16 cm² planta⁻¹), seguido por AB-V5 (186,88 cm² planta⁻¹) e ESA 599 (179,03 cm²). O tratamento constituído por ESA 601 apresentou valores médios intermediários, enquanto CN, ESA 118 e SN apresentaram os menores valores.

Tabela 3. Valores médios para área foliar (AF) de mudas de *Agave sisalana*.

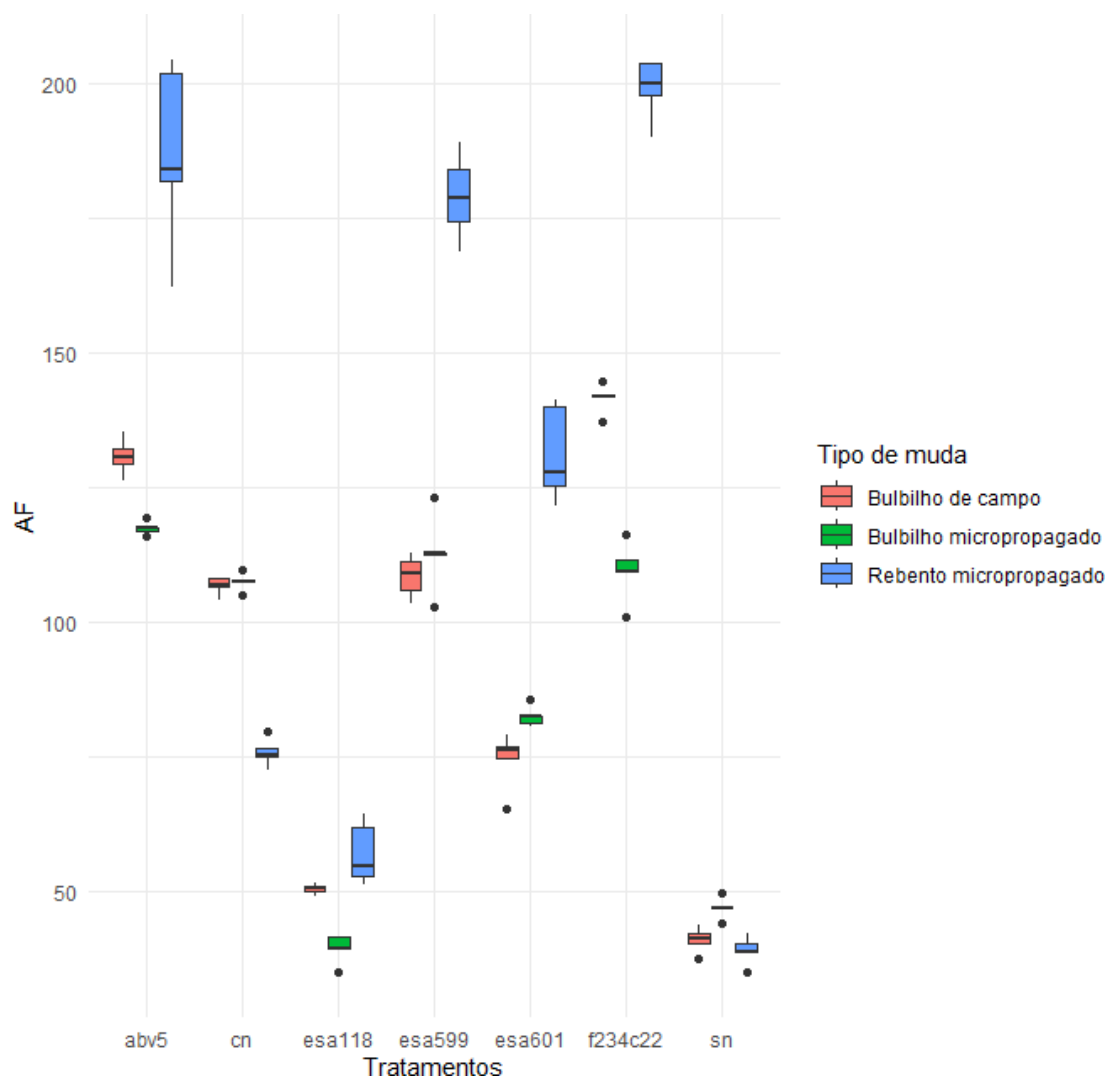
Tratamentos	Bulbilho de campo	Bulbilho micropropagado	Rebento micropropagado
AB-V5	130,72 aB	117,40 aC	186,88 bA
CN	106,76 bA	107,49 aA	75,82 dB
ESA 118	50,45 dA	39,38 cB	56,95 eA
ESA 599	108,52 bB	112,80 aB	179,03 bA
ESA 601	74,42 cB	82,49 bB	131,24 cA
UFRBB			
F234C	141,57 aB	109,50 aC	199,16 aA
2- 2			
SN	40,97 dA	46,92 cA	39,01 fA

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e pelas mesmas letras minúsculas nas colunas pertencem ao mesmo grupo pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

O boxplot indica que os rebentos micropropagados apresentam as maiores AF, com destaque para UFRB FA34C2-2 e AB-V5 (medianas próximas de 200 e 185 cm² planta⁻¹) e, em seguida, ESA 599 e ESA 601 (medianas em torno de 180 e 130 cm² planta⁻¹,) (Figura 5). Uma exceção clara é CN, no qual os rebentos exibem a menor AF do tratamento (mediana 76 cm² planta⁻¹), ficando abaixo dos dois tipos de bulbilho. Entre os bulbilhos de campo, as maiores medianas concentram-se em UFRB FA34C2-2 e AB-V5 (140 e 130 cm² planta⁻¹), seguidos por ESA 599 e CN (110 cm² planta⁻¹). Para o bulbilho micropropagado, o desempenho superior aparece em ESA

599/AB-V5/UFRB FA34C2-2/CN (110-120 cm² planta⁻¹), enquanto ESA 601 é intermediário (80 cm² planta⁻¹). Em ESA 118 e SN todos os tipos de muda ficam com AF baixas, confirmando tratamentos pouco responsivos. A dispersão também varia, os rebentos sob Ab-V5 e UFRB FA34C2- 2 exibem amplitude maior, indicando resposta mais responsiva desses materiais sob condições favoráveis, já os bulbilhos, sobretudo em CN e SN, mostram variabilidade pequena, coerente com baixos ganhos absolutos.

Figura 5. Box-plot para área foliar (AF) de mudas de *Agave sisalana*.



Em relação ao diâmetro do pseudocaule (DP), ao comparar tipos de muda dentro de cada tratamento ($p < 0,05$), observou-se que em AB-V5 o

rebento micropropagado ($4,92 \text{ mm planta}^{-1}$) não diferiu do bulbilho de campo ($5,07 \text{ mm planta}^{-1}$) e ambos superaram o bulbilho micropropagado (Tabela 4). Em CN, bulbilho de campo ($3,92 \text{ mm planta}^{-1}$) e rebento ($3,94 \text{ mm planta}^{-1}$) foram superiores ao bulbilho micropropagado. Em ESA 118, rebento ($3,00 \text{ mm planta}^{-1}$) e bulbilho de campo ($2,95 \text{ mm planta}^{-1}$) superaram o bulbilho micropropagado. Em ESA 599, rebento ($4,38 \text{ mm planta}^{-1}$) e bulbilho de campo ($4,41 \text{ mm planta}^{-1}$) foi maior que o bulbilho micropropagado. Em ESA 601, rebento apresentou média de $4,22 \text{ mm planta}^{-1}$ e bulbilho de campo de $4,27 \text{ mm planta}^{-1}$, sendo maiores que o bulbilho micropropagado. Em UFRB FA34C2- e SN não houve diferença entre tipos de mudas.

Para os tratamentos dentro de cada tipo de muda, no bulbilho de campo destacou-se AB-V5 ($5,07 \text{ mm planta}^{-1}$), seguido do patamar intermediário UFRB FA34C2-2, ESA 599 e ESA 601, enquanto que, CN foi inferior e os menores valores ocorreram em ESA 118 e SN (Tabela 4). Para o bulbilho micropropagado, as maiores médias foram UFRB FA34C2-2 ($4,58 \text{ mm planta}^{-1}$), AB-V5 ($4,31 \text{ mm planta}^{-1}$) e CN ($3,85 \text{ mm planta}^{-1}$), valores intermediários em ESA 599 e ESA 601 e mínimos em ESA 118 e S. Entre os rebentos micropropagados, AB-V5 ($4,92 \text{ mm planta}^{-1}$) e UFRB FA34C2-2 ($4,90 \text{ mm planta}^{-1}$) foram os tratamentos com médias superiores, enquanto que, ESA 599, ESA 601 e CN compuseram nível intermediário e os menores valores foram observados em ESA 118 e SN.

Tabela 4. Valores médios para diâmetro do pseudocaule (DP) de mudas de *Agave sisalana*.

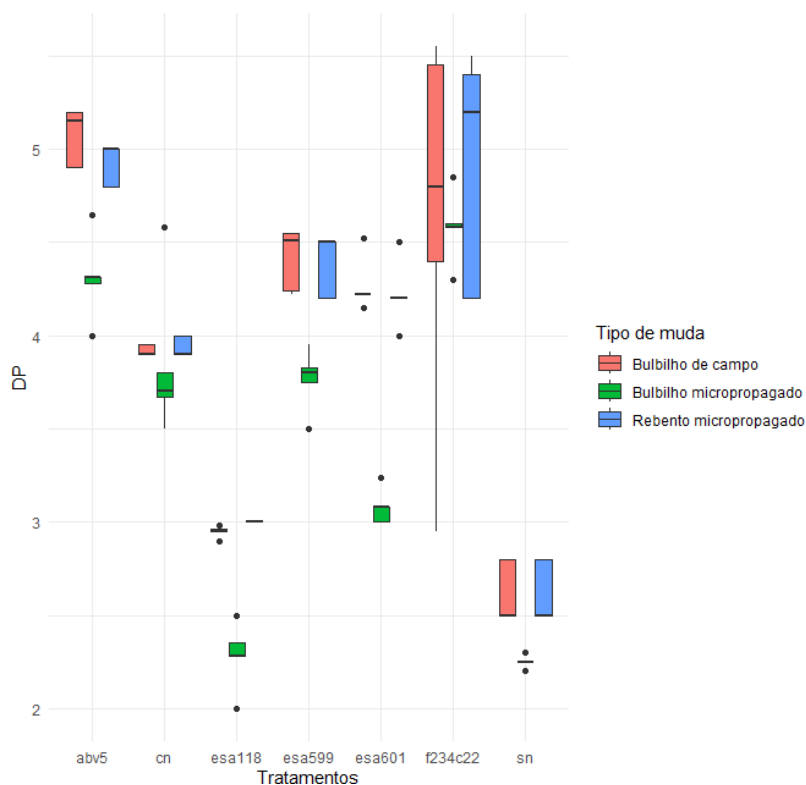
Tratamentos	Bulbilho de campo	Bulbilho micropropagado	Rebento micropropagado
AB-V5	5,07 aA	4,31 aB	4,92 aA
CN	3,92 cA	3,85 bA	3,94 bA
ESA 118	2,95 dA	2,28 dB	3,00 cA
ESA 599	4,41 bA	3,77 bB	4,38 bA
ESA 601	4,27 bA	3,08 cB	4,22 bA
UFRB FA34C2-2	4,63 bA	4,58 aA	4,90 aA

SN	2,62 dA	2,25 dA	2,62 dA
----	---------	---------	---------

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e pelas mesmas letras minúsculas nas colunas pertencem ao mesmo grupo pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

De acordo com o Box-plot, os DP concentram-se em AB-V5 e, sobretudo, em UFRB FA34C2-2, nos quais rebentos micropropagados e bulbilhos de campo apresentam medianas elevadas (5-5,5 mm planta⁻¹), enquanto o bulbilho micropropagado fica ligeiramente abaixo e com maior variabilidade em UFRB FA34C2-2 (Figura 6). Em ESA 599, os valores são intermediários, bulbilho de campo e rebento não diferem significativamente entre si e ambos apresentam valores superiores aos do bulbilho micropropagado. No tratamento CN, observa-se rebento > bulbilhos, ao passo que em ESA 601 o bulbilho de campo supera o micropropagado (rebento em patamar próximo ao do bulbilho de campo). Já ESA 118 e SN compõem consistentemente o pior cenário, com DP baixo para todos os tipos (2,2-3,0 mm planta⁻¹) e pouca dispersão. O bulbilho micropropagado tende a apresentar DP menor que os demais tipos na maioria dos tratamentos, enquanto rebentos micropropagados e bulbilhos de campo são superiores quando combinados com AB-V5 ou UFRB FA34C2-2. A maior amplitude observada em UFRB FA34C2-2 indica resposta mais plástica sob esse manejo.

Figura 6. Box-plot para teor de diâmetro do pseudocaule (DP) de mudas de *Agave sisalana*



A massa de matéria seca da parte aérea (MSPA) variou de forma dependente da combinação entre tipo de muda e tratamento ($p < 0,05$). Os rebentos micropropagados superaram os bulbilhos em AB-V5 com médias de 88,28, 83,99, 78,28 g planta⁻¹ e ESA 118 com 35,88, 26,33 e 22,88 g planta⁻¹, enquanto em UFRB FA34C2-2 e ESA 601 o rebento não diferiu do bulbilho de campo, mas foi superior ao bulbilho micropropagado com 85,34-73,32 g planta⁻¹. Em ESA 599 os três tipos de mudas não diferiram, e em CN o bulbilho de campo foi superior com média 86,26 g planta⁻¹, com rebento e bulbilho micropropagado as médias foram inferiores. No tratamento SN, o bulbilho de campo manteve vantagem (21,79 g planta⁻¹) em relação aos demais (17,14-17,59 g planta⁻¹).

Em relação aos tratamentos dentro de cada tipo de muda ($p < 0,05$) o bulbilho de campo apresentou maior MSPA em UFRBFA34C2-2 (89,02 g planta⁻¹) e CN (86,26 g planta⁻¹), seguido por AB-V5 e ESA 601 (Tabela 5). O tratamento ESA 599 apresentou valor médio intermediário com e SN menores valores. Para o bulbilho micropropagado, os tratamentos com

médias superiores foram representados por UFRBFA34C2-2 (85,34 g planta⁻¹) e AB-V5 (83,99 g planta⁻¹). Os tratamentos ESA 599 e ESA 601 foram intermediários, enquanto que os tratamentos CN, ESA 118 e SN apresentaram as menores médias. Entre os rebentos micropropagados, Ab-V5 (88,28 g planta⁻¹) e UFRB FA34C2-2 (87,82 g planta⁻¹) formaram os tratamentos superiores, seguidos por ESA 601 e ESA 599. Os tratamentos CN, ESA 118 e SN apresentaram os menores valores.

Tabela 5. Valores médios para massa seca da parte área (MSPA) de mudas de *Agave sisalana*.

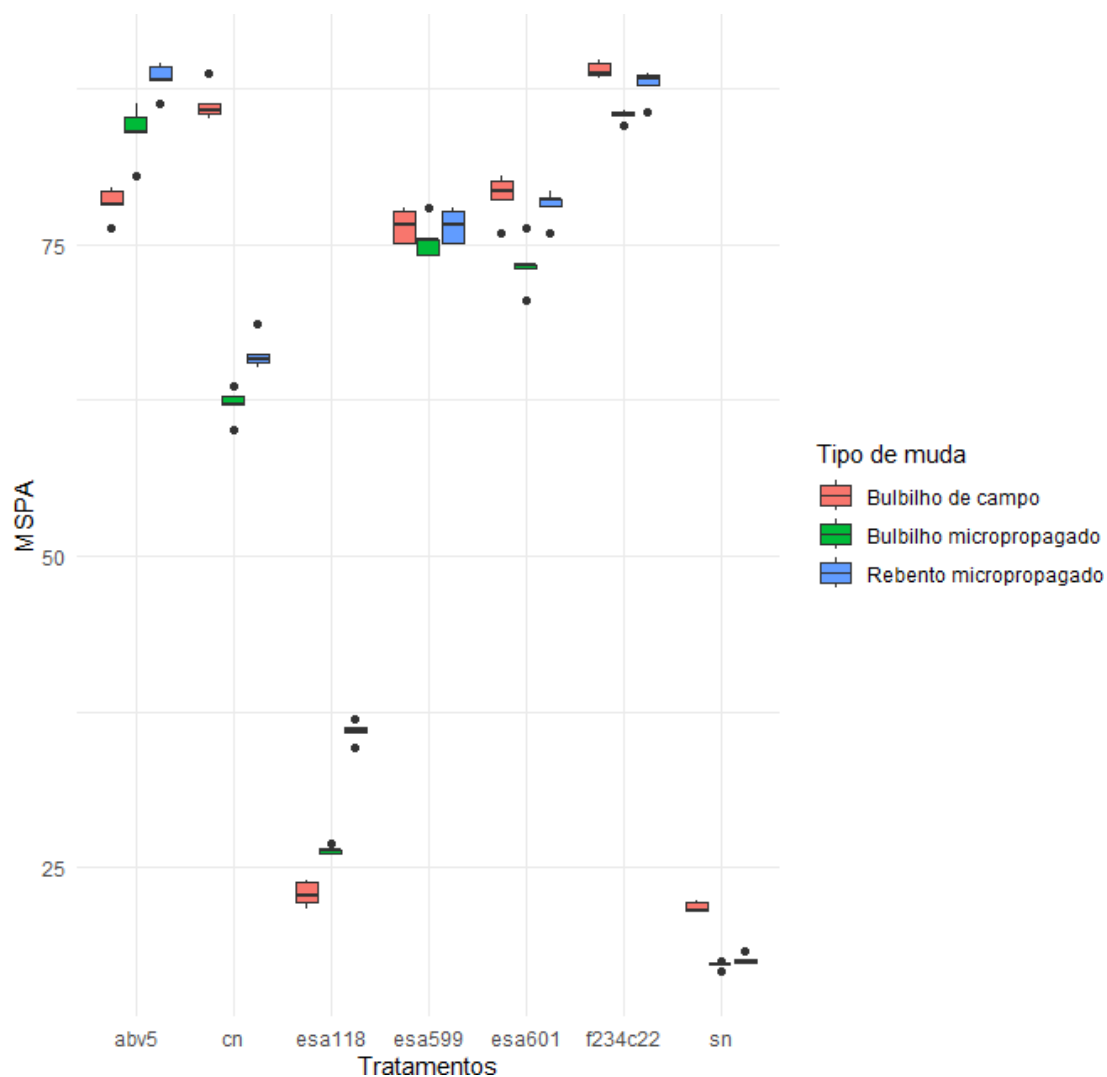
Tratamentos	Bulbilho de campo	Bulbilho micropropagado	Rebento micropropagado
AB-V5	78,28 cC	83,99 aB	88,28 aA
CN	86,26 bA	62,19 cC	66,26 cB
ESA 118	22,88 eC	26,33 dB	35,88 dA
ESA 599	76,46 dA	75,36 bA	76,46 bA
ESA 601	78,90 cA	73,32 bB	78,10 bA
UFRB F234C22	89,02 aA	85,34 aB	87,82 aA
SN	21,79 eA	17,14 eB	17,59 eB

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e pelas mesmas letras minúsculas nas colunas pertencem ao mesmo grupo pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

O Box-plot indica que os valores de MSPA concentram-se em AB-V5 e UFRB FA34C2-2, para ambos, o rebento micropropagado apresenta as maiores medianas, seguido do bulbilho de campo e, por último, do bulbilho micropropagado, em UFRB FA34C2-2, os três tipos mantêm patamar elevado (Figura 7). Em CN, o padrão se inverte, o bulbilho de campo é superior, enquanto rebentos e bulbilhos micropropagados ficam abaixo. Em ESA 599, os três tipos de muda não diferiram significativamente entre si, com medianas na faixa de 75 a 76. Em ESA 601, o desempenho foi intermediário, pelo mesmo teste, bulbilho de campo e rebento não diferiram entre si e ambos apresentaram valores superiores ao bulbilho micropropagado. Já ESA 118 e SN compõem o pior cenário independentemente do tipo de muda (níveis baixos), com leve vantagem do rebento em ESA 118 e do bulbilho de campo em SN. A variabilidade intragrupo é, em geral, pequena, reforçando a precisão do experimento, ligeira amplitude maior aparece nos tratamentos

de melhor desempenho (AB-V5 e UFRB FA34C2-2) para rebentos.

Figura 7. Box-plot para massa seca da parte área (MSPA) de mudas de *Agave sisalana*.



A massa de matéria seca da raiz (MSR) variou de forma dependente da combinação entre tipo de muda e tratamento ($p < 0,05$) (Tabela 6). Na comparação intratratamento, para AB-V5 prevaleceu o efeito do bulbilho de campo com $29,40 \text{ g planta}^{-1}$, seguido do rebento micropropagado com $27,40 \text{ g planta}^{-1}$ e menor média foi para o bulbilho micropropagado. O mesmo comportamento foi observado para os demais tratamentos em CN, ESA 601 ($29,39$, $19,79$ e $18,38 \text{ g planta}^{-1}$, respectivamente), UFRB e SN. Em ESA

118 houve exceção, o rebento apresentou maior MSR (13,37 g planta⁻¹), sem diferença entre os dois tipos de bulbilho.

Em relação aos tratamentos dentro de cada tipo de muda, o bulbilho de campo apresentou destaque para UFRB FA34C2-2 (30,74 g planta⁻¹), seguido por AB-V5 e ESA 601, depois ESA 599, CN e os menores em ESA 118 e SN (Tabela 6). No Bulbilho micropropagado, melhor desempenho foi verificado para UFRB FA34C2-2 (19,69 g planta⁻¹), enquanto que, AB-V5, ESA 599 e ESA 601 apresentaram valores intermediário e CN, ESA 118 e SN ficaram abaixo. Já para o rebento micropropagado, observou-se superioridade de AB-V5 (27,40 g planta⁻¹), seguido por UFRB FA34C2-2 (24,34 g planta⁻¹), ESA 599 (22,20 g planta⁻¹), ESA 601 (19,79 g planta⁻¹), CN (17,78 g planta⁻¹) e ESA 118 e SN apresentou médias inferiores.

Tabela 6. Valores médios para massa seca da raiz (MSR) de mudas de *Agave sisalana*.

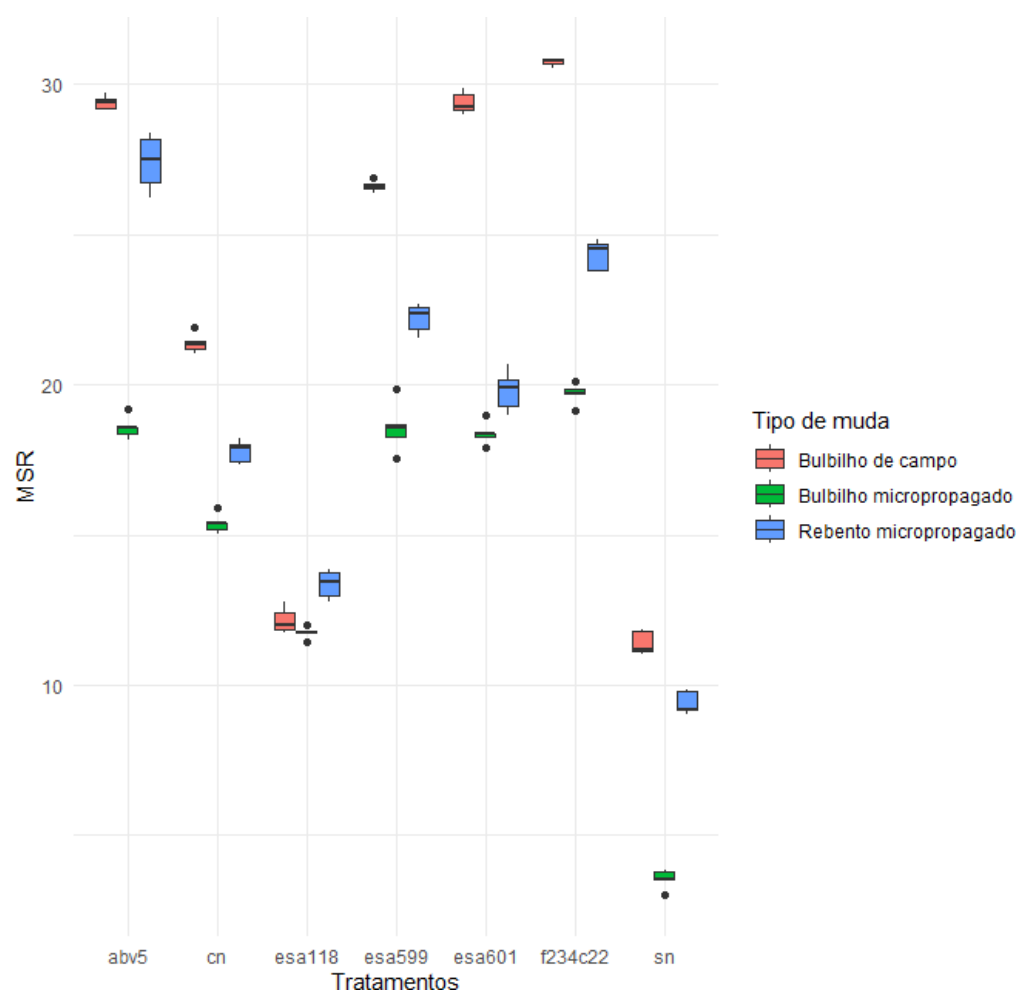
Tratamentos	Bulbilho de campo	Bulbilho micropropagado	Rebento micropropagado
AB-V5	29,40 bA	18,59 bC	27,40 aB
CN	21,38 dA	15,37 cC	17,78 eB
ESA 118	12,17 eB	11,73 dB	13,37 fA
ESA 599	26,60 cA	18,58 bC	22,20 cB
ESA 601	29,39 bA	18,38 bC	19,79 dB
UFRB			
FA34C2- 2	30,74 aA	19,69 aC	24,34 bB
SN	11,39 eA	3,55 eC	9,39 gB

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e pelas mesmas letras minúsculas nas colunas pertencem ao mesmo grupo pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Para MSR o Box-plot indica que, em AB-V5, CN, ESA 599, ESA 601, UFRB FA34C2-2 e SN repete-se a hierarquia bulbilho de campo > rebento micropropagado > bulbilho micropropagado, em AB-V5, as medianas ficam em 29, 27 e 19 g planta⁻¹, em CN, 21, 18 e 15 g planta⁻¹, em ESA 599, 29, 22 e 19 g planta⁻¹, em ESA 601, 29, 20 e 18 g planta⁻¹, em UFRB FA34C2-2, 31, 24 e 20 g planta⁻¹ e em SN, 12, 9-10 e 4 g planta⁻¹, respectivamente (Figura 8). A única

exceção é ESA 118, em que o rebento supera levemente os bulbilhos. As caixas estreitas indicam baixa variabilidade dentro de cada combinação, com pequenas amplitudes apenas nos tratamentos de maior resposta.

Figura 8. Box-plot para massa seca da raiz (MSR) de mudas de *Agave sisalana*.



A resposta de massa de matéria seca total (MST) depende da combinação entre tipo de muda e tratamento ($p < 0,05$) (Tabela 7). Em AB-V5 e ESA 118 o rebento micropropagado apresentou as maiores MST (115,67 e 49,25 g planta⁻¹), superando os bulbilhos, já em CN (107,64 g planta⁻¹), ESA 599 (103,06 g planta⁻¹), ESA 601 (108,29 g planta⁻¹), UFRB FA34C2-2 (119,75 g planta⁻¹) e SN (33,19 g planta⁻¹) o bulbilho de campo foi superior, seguido do rebento e, por último, do

bulbilho micropropagado. Assim, na maioria dos tratamentos o bulbilho de campo lidera, com exceção de AB-V5 e ESA 118, nos quais o rebento se destaca.

Considerando os tratamentos dentro de cada tipo de muda, o bulbilho de campo teve maior média em UFRB FA34C2-2 (119,75 g planta⁻¹), seguido por AB-V5, CN e ESA 601, depois ESA 599, e muito abaixo em ESA 118 e SN (Tabela 7). No bulbilho micropropagado, o melhor desempenho ocorreu com UFRB FA34C2-2 (105,03 g planta⁻¹) e AB-V5 (102,58 g planta⁻¹), valores intermediários foram observados em ESA 599 e ESA 601, depois CN, e os menores em ESA 118 e SN. Entre os rebentos micropropagados, o Ab-V5 foi superior (115,67 g planta⁻¹), seguido por UFRB FA34C2-2 (112,15 g planta⁻¹), valores intermediários foram verificados em ESA 599 e ESA 601 e em CN, e os menores valores em ESA 118 e SN.

Tabela 7. Valores médios para massa seca total (MST) de mudas de *Agave sisalana*.

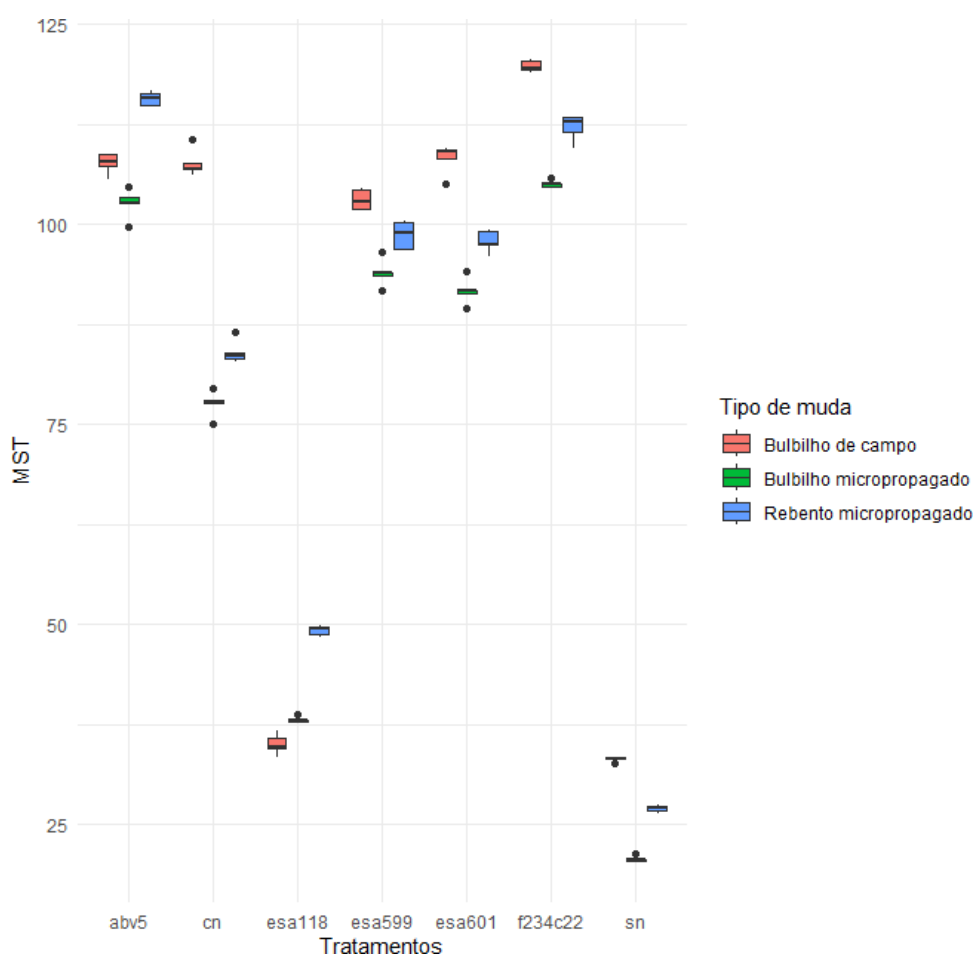
Tratamentos	Bulbilho de campo	Bulbilho micropropagado	Rebento micropropagado
AB-V5	107,67 bB	102,58 aC	115,67 aA
CN	107,64 bA	77,57 cC	84,04 dB
ESA 118	35,05 dC	38,06 dB	49,25 eA
ESA 599	103,06 cA	93,95 bC	98,66 cB
ESA 601	108,29 bA	91,70 bC	97,89 cB
UFRB FA34C2-2	119,75 aA	105,03 aC	112,15 bB
SN	33,19 dA	20,69 eC	26,99 fB

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e pelas mesmas letras minúsculas nas colunas pertencem ao mesmo grupo pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Para MST, em termos de tratamentos, observa-se através do Box-plot um patamar superior em UFRB FA34C2-22 e AB-V5, seguidos por ESA 599 e ESA 601, CN ocupa nível intermediário e ESA 118 e SN constituem os piores cenários (Figura 9). Entre os tipos de muda, o rebento micropropagado apresenta as maiores MST quando associado a AB-V5 e UFRB FA34C2-22 (grupo superiores), mantendo desempenho intermediário em ESA 599 e ESA 601 e inferior em CN, ESA 118 e SN. O bulbilho de

campo também se destaca em UFRB FA34C2-22 e AB-V5 e, de modo geral, supera os demais em CN, ESA 599 e ESA 601 e reduz acentuadamente em ESA 118 e SN. O bulbilho micropropagado é, de forma consistente, o tipo com menores valores de MST na maioria dos tratamentos, com leve melhora apenas sob UFRB FA34C2-22 e AB-V5. As caixas estreitas indicam baixa variabilidade intragrupo, reforçando a confiabilidade das diferenças.

Figura 9. Box-plot para massa seca total (MST) de mudas de *Agave sisalana*.



A clorofila a (CLA) variou em função da combinação entre tipo de muda e tratamento ($p < 0,05$) (Tabela 8). Na comparação intratratamento, observou-se que, em AB-V5, o rebento micropropagado apresentou a maior CLA (46,58), superando o bulbilho de campo e o bulbilho micropropagado. Em CN, o rebento foi semelhante ao bulbilho de campo e superior ao

bulbilho micropropagado. Efeito semelhante ocorreu em ESA 599 e ESA 601, nos quais rebento e bulbilho de campo não diferiram, mas ambos superaram o bulbilho micropropagado. Em UFRB F23C42-2, os três tipos de mudas não diferiram nos bulbilhos. Nos tratamentos ESA 118 e SN, não houve diferença entre tipos de mudas, com valores absolutos baixos.

Ao comparar tratamentos dentro de cada tipo de muda, o bulbilho de campo exibiu valores médios superiores para CN (41,46), AB-V5 (39,60) e UFRB FA34C2-2 (39,28), enquanto que os tratamentos representados por ESA 599 e ESA 601 foram intermediários e ESA 118 e SN resultaram em médias inferiores (Tabela 8). Para o bulbilho micropropagado, destacou-se UFRB FA34C2-2 (36,40), seguido por AB-V5 e CN, enquanto que ESA 599 e ESA 601 foram intermediários e ESA 118 e SN apresentaram os menores valores. Entre os rebentos micropropagados, AB-V5 (46,58) e UFRB FA34C2-2 (42,90) foram os tratamentos superiores, o CN ocupou posição intermediária superior, ESA 599 e ESA 601 foram intermediários, e ESA 118 e SN permaneceram com médias inferiores.

Tabela 8. Valores médios para clorofila a (CLA) de mudas de *Agave sisalana*.

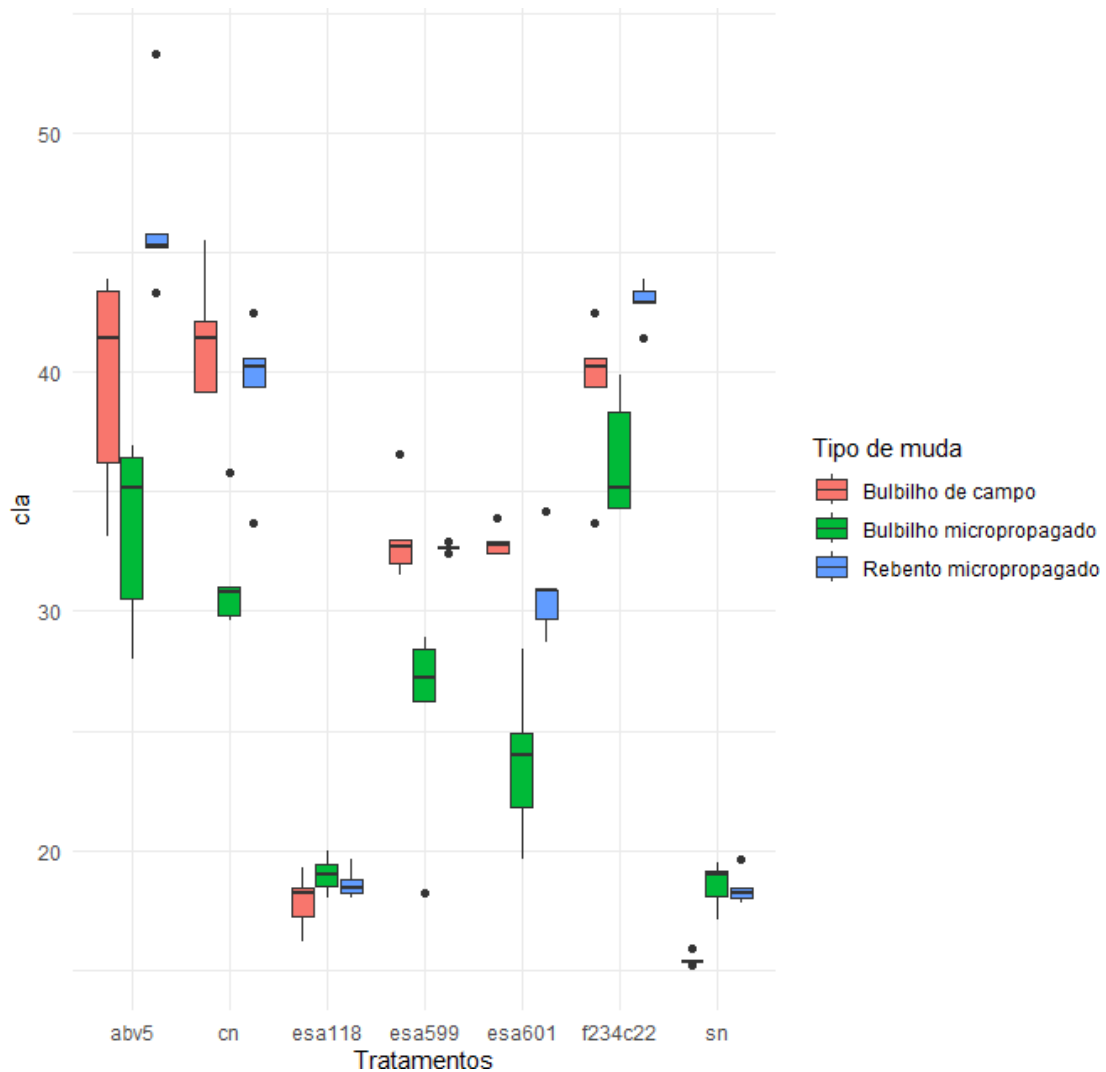
Tratamentos	Bulbilho de campo	Bulbilho micropropagado	Rebento micropropagado
AB-V5	39,60 aB	33,40 bC	46,58 aA
CN	41,46 aA	31,40 bB	39,28 bA
ESA 118	17,86 cA	18,98 dA	18,60 dA
ESA 599	33,16 bA	25,78 cB	32,65 cA
ESA 601	32,88 bA	23,74 cB	30,87 cA
UFRB			
FA34C2- 2	39,28 aAB	36,40 aB	42,90 aA
SN	15,40 cA	18,56 dA	18,40 dA

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e pelas mesmas letras minúsculas nas colunas pertencem ao mesmo grupo pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Os rebentos micropropagados apresentaram os maiores teores de CLA, conforme observado no Box-plot, com destaque para AB-V5 e UFRB FA34C2-2, que exibem medianas elevadas e distribuição superior às dos bulbilhos (Figura 10). O tratamento CN manteve níveis altos de CLA para bulbilho de campo (e

próximos nos rebentos), enquanto ESA 599 e ESA 601 compuseram um patamar intermediário, no qual o bulbilho micropropagado tende a situar-se abaixo dos demais tipos. Já ESA 118 e SN formaram consistentemente o grupo de menor CLA, independentemente do material propagativo, com baixa variabilidade intragrupo. A amplitude das caixas indica variabilidade um pouco maior nos rebentos sob AB-V5 e UFRB FA34C2-2 sugerindo maior plasticidade sob condições favoráveis, enquanto tratamentos de baixo desempenho exibem dispersão reduzida.

Figura 10. Box-plot para clorofila a (CLA) de mudas de *Agave sisalana*.



A clorofila b (CLB) variou de forma dependente da combinação entre tipo de muda e tratamento ($p < 0,005$) (Tabela 9). Na comparação intratratamento, o rebento micropropagado apresentou a maior CLB em AB-V5 (26,06), superando o bulbilho de campo e o bulbilho micropropagado. Em UFRB FA34C2-2, o bulbilho de campo foi superior (22,22), seguido do rebento e do bulbilho micropropagado. Em CN e ESA 599, o bulbilho de campo foi o mais elevado (21,68 e 21,08, respectivamente), com o rebento em nível intermediário e o bulbilho micropropagado como o menor valor médio. EM ESA 601, o rebento (12,63) superou o bulbilho micropropagado, enquanto o bulbilho de campo apresentou média intermediária, sem diferir dos demais. Nos tratamentos ESA 118 e SN não houve diferença entre tipos de mudas, e os valores foram baixos.

Considerando os tratamentos dentro de cada tipo de muda, o bulbilho de campo mostrou grupo superior formado por UFRB FA34C2-2, CN, ESA 599, AB-V5 e ESA 601 com médias de CLB variando de 10- 22, enquanto ESA 118 e SN apresentaram médias inferiores (Tabela 9). No bulbilho micropropagado, os tratamentos superiores foram UFRB FA34C2-2, CN, AB-V5 e ESA 601 (10-13), enquanto ESA 118, ESA 599 e SN foram os tratamentos com médias inferiores. Entre os rebentos micropropagados, o AB-V5 apresentou o maior valor com CLB de 26,06, seguido por UFRB FA34C2-2, CN, ESA 599 e ESA 601, enquanto ESA 118 e SN foram inferiores.

Tabela 9. Valores médios para clorofila b (CLB) de mudas de *Agave sisalana*.

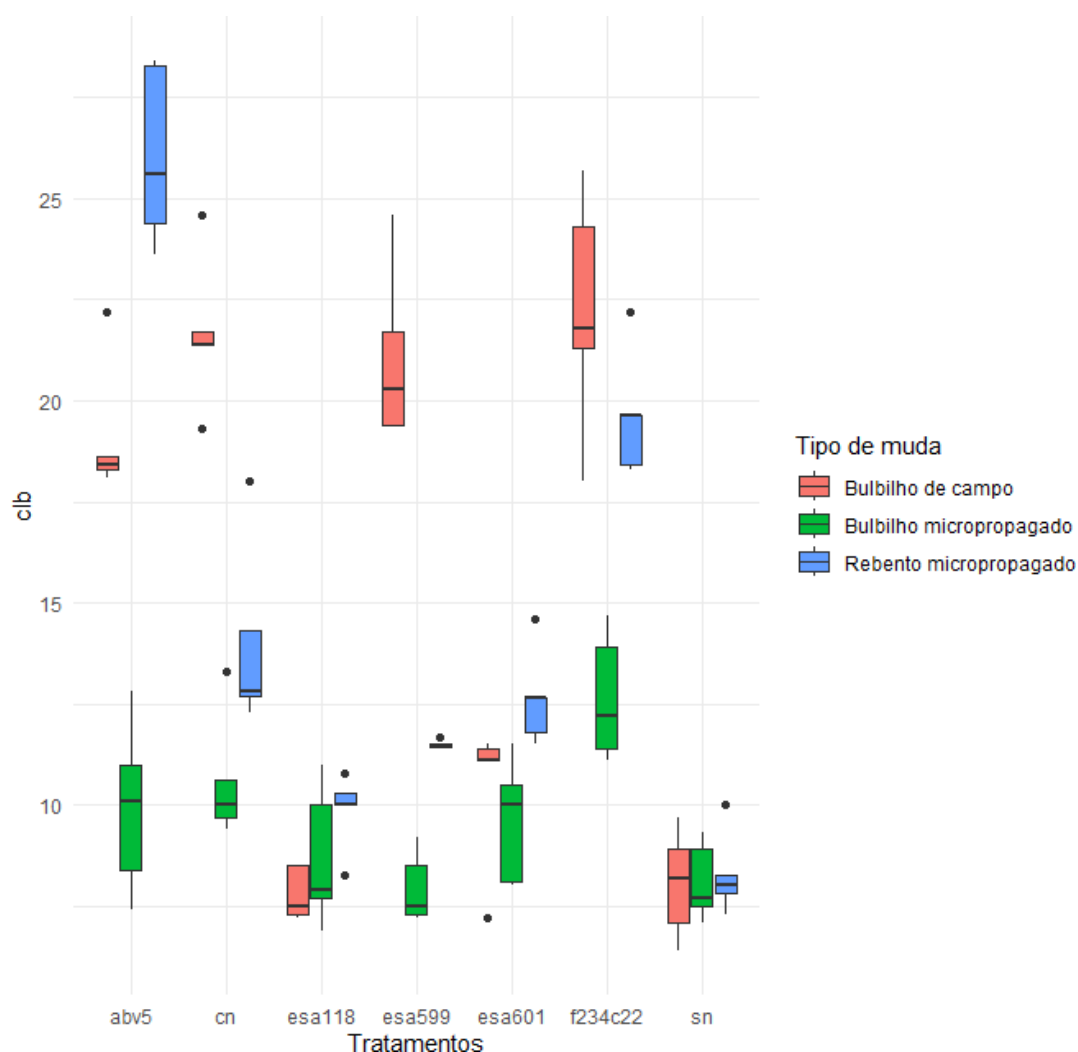
Tratamentos	Bulbilho de campo	Bulbilho micropropagado	Rebento micropropagado
AB-V5	19,12 aB	9,94 aC	26,06 aA
CN	21,68 aA	10,60 aC	14,02 cB
ESA 118	7,80 bA	8,70 bA	9,88 eA
ESA 599	21,08 aA	7,94 bC	11,50 dB
ESA 601	10,46 bAB	9,62 aB	12,63 dA
UFRB- FA34C2-2	22,22 aA	12,66 aC	19,63 bB
SN	8,06 bA	8,10 bA	8,28 fA

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e pelas mesmas

letras minúsculas nas colunas pertencem ao mesmo grupo pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

O Box-plot indica que, os rebentos micropropagados exibem os maiores teores de CLB quando combinados com AB-V5 (mediana 25-27) e, em menor magnitude, com UFRB FA34C2-2, valores caem para um patamar intermediário em CN (14) e ESA 599/ESA 601 (11-13) e são baixos em ESA 118 e SN (8-10) (Figura 11). Entre os bulbilhos de campo, os melhores desempenhos concentram-se em UFRB FA34C2-2 (mediana mais alta e maior amplitude) e CN, seguidos de AB-V5, ESA 601/ESA 599 ficam em nível intermediário e ESA 118/SN compõem o grupo inferior. Para o bulbilho micropropagado, os maiores valores ocorrem em UFRB FA34C2-2 (12-14) e AB-V5/CN (10-11), ESA 601 permanece intermediário, enquanto ESA 599, ESA 118 e SN apresentam os menores teores. A variabilidade é mais ampla em combinações de alto desempenho (como por exemplo rebento + AB-V5 e bulbilho de campo + UFRB FA34C2-2), indicando maior plasticidade sob condições favoráveis.

Figura 11. Box-plot para clorofila b (CLB) de mudas de *Agave sisalana*.



A clorofila total (CLT) respondeu de positivamente à combinação entre tipo de muda e tratamento ($p < 0,05$). Na comparação intratratamento, observou-se que, em AB-V5 o rebento micropropagado apresentou o maior teor de CLT (72,64), superando o bulbilho de campo e o bulbilho micropropagado, em CN, o bulbilho de campo foi superior (63,14), seguido do rebento e do bulbilho micropropagado. Em ESA 599, o bulbilho de campo superou os demais (54,24), com rebento intermediário e bulbilho micropropagado inferior, em ESA 601, bulbilho de campo e rebento não diferiram e ambos foram superiores ao bulbilho micropropagado. Em UFRB FA34C2-2, bulbilho de campo e rebento também não diferiram e foram

superiores ao bulbilho micropropagado. Para ESA 118 e SN, não houve diferença entre tipos de mudas, com valores de baixos.

Em relação aos tratamentos dentro de cada tipo de muda, o bulbilho de campo apresentou os maiores valores em CN e UFRB FA34C2-2 (61-63), seguidos por AB-V5 e ESA 599, enquanto que, ESA 601 apresentou média intermediária e ESA 118 e SN os menores valores médios (Tabela 10). No bulbilho micropropagado, o destaque foi UFRB FA34C2-2 (49,06), com desempenho intermediário de AB-V5 e CN, valores médios-baixos para ESA 599 e ESA 601 e os menores em ESA 118 e SN. Entre os rebentos micropropagados, o maior teor ocorreu em AB-V5 (72,64), seguido por UFRB FA34C2-2 (62,53) e CN (53,30), ESA 599 e ESA 601 foram intermediários e ESA 118 e SN mantiveram os menores valores.

Tabela 10. Valores médios para clorofila total (CLT) de mudas de *Agave sisalana*.

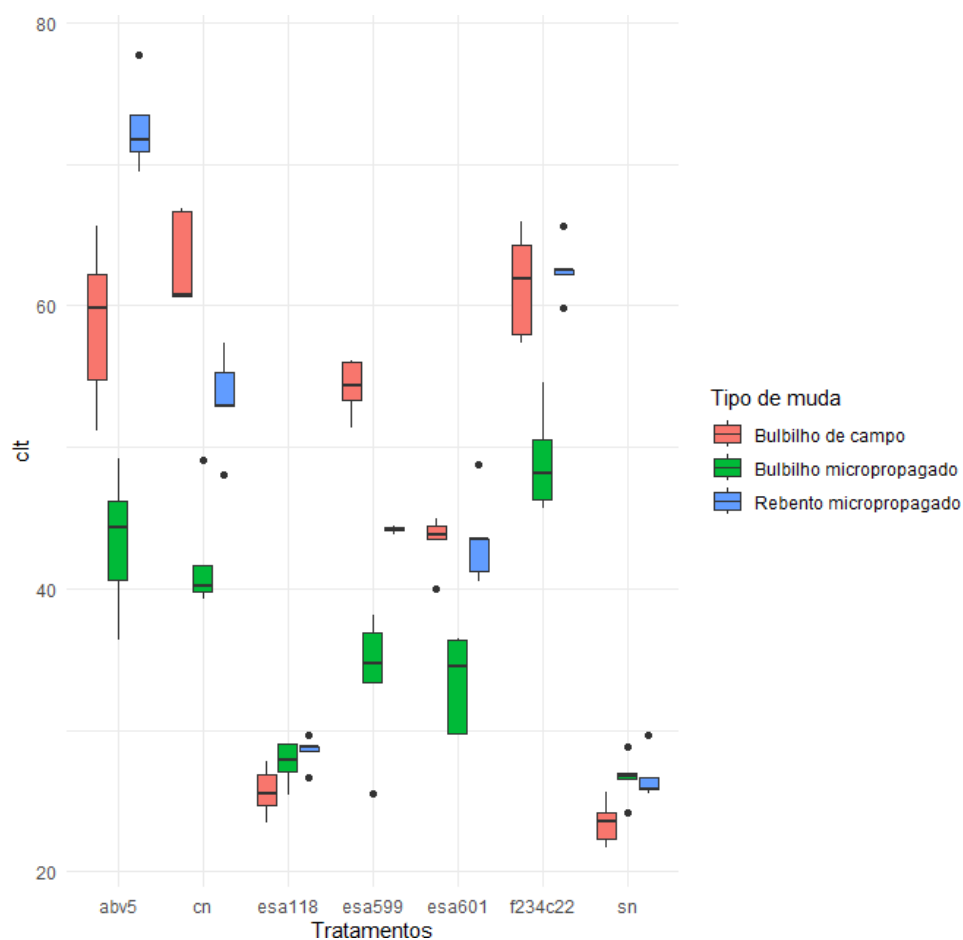
Tratamentos	Bulbilho de campo	Bulbilho micropropagado	Rebento micropropagado
AB-V5	58,72 bB	43,34 bC	72,64 aA
CN	63,14 aA	42,00 bC	53,30 cB
ESA 118	25,66 dA	27,68 dA	28,48 eA
ESA 599	54,24 bA	33,72 cC	44,15 dB
ESA 601	43,34 cA	33,36 cB	43,50 dA
UFRB			
FA34C2- 2	61,50 aA	49,06 aB	62,53 bA
SN	23,46 dA	26,66 dA	26,68 eA

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e pelas mesmas letras minúsculas nas colunas pertencem ao mesmo grupo pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Os maiores teores de CLT conforme indicado no Box-plot, ocorreram em rebentos micropropagados sob AB-V5 (70) e UFRB FA34C2-2 (62), seguidos por CN. Em CN, porém, quem lidera é o bulbilho de campo (63-68), superando rebentos e bulbilhos micropropagados (Figura 12). O bulbilho de campo apresentou valores significativamente maiores que os do rebento, os quais, por sua vez, foram superiores aos do bulbilho micropropagado (54, 41-44 e 33-34, respectivamente). Em ESA 601, pelo mesmo teste, bulbilho de campo e rebento não diferiram significativamente entre si (ambos 43) e ambos superaram o bulbilho micropropagado (33). Os tratamentos ESA

118 e SN apresentaram os menores teores de CLT independentemente do tipo de muda (23-28), indicando baixa responsividade. A variabilidade é um pouco maior nas combinações de melhor desempenho (por exemplo, rebento + AB-V5/F23C422 e bulbilho de campo + CN), sugerindo maior plasticidade sob condições favoráveis.

Figura 12. Box-plot para clorofila total (CLT) de mudas de *Agave sisalana*.



O teor foliar de nitrogênio (N) variou conforme a combinação entre tipo de muda e tratamento ($p < 0,05$) (Tabela 11). Na comparação intratratamento, observou-se que, em AB-V5, o rebento micropropagado e o bulbilho de campo apresentaram teores semelhantes e superiores ao bulbilho micropropagado ($44,04, 43,72 \text{ g kg}^{-1}$). Em CN, o rebento superou ambos os bulbilhos, não diferindo entre si. Em ESA 599, o bulbilho de campo foi superior ($39,12 \text{ g kg}^{-1}$), enquanto em ESA 601 rebento e bulbilho de campo

não diferiram entre si e foram maiores que o bulbilho micropropagado. Em UFRB FA34C2-2, o rebento tendeu a ser mais elevado (42,63 g kg⁻¹), com o bulbilho de campo em posição intermediária e o bulbilho micropropagado inferior. Já em ESA 118 os bulbilhos de campo e os rebentos não diferiram (23,38 e 23,67 g kg⁻¹) e ambos superaram o bulbilho micropropagado, em SN, o bulbilho de campo foi superior aos demais (24,58 g kg⁻¹).

Para os tratamentos dentro de cada tipo de muda, o bulbilho de campo formou grupo superior com AB-V5, CN, ESA 599 e UFRB FA34C2-2 (39-43 g kg⁻¹), seguido de ESA 601 e, menores valores médios foram observados em ESA 118 e SN (Tabela 11). No bulbilho micropropagado, os maiores valores ocorreram em AB-V5, CN e UFRB FA34C2-2 (38-40 g kg⁻¹), com ESA 599 e ESA 601 em nível intermediário e ESA 118 e SN nos menores. Entre os rebentos micropropagados, destacaram-se CN e AB-V5 (46,45 e 44,04 g kg⁻¹), seguidos por UFRB FA34C2-2 (42,63 g kg⁻¹), ESA 599 e ESA 601 resultaram em valores intermediário, e os menores teores foram registrados em ESA 118 e SN.

Tabela 11. Valores médios para teor de N (N) de mudas de *Agave sisalana*.

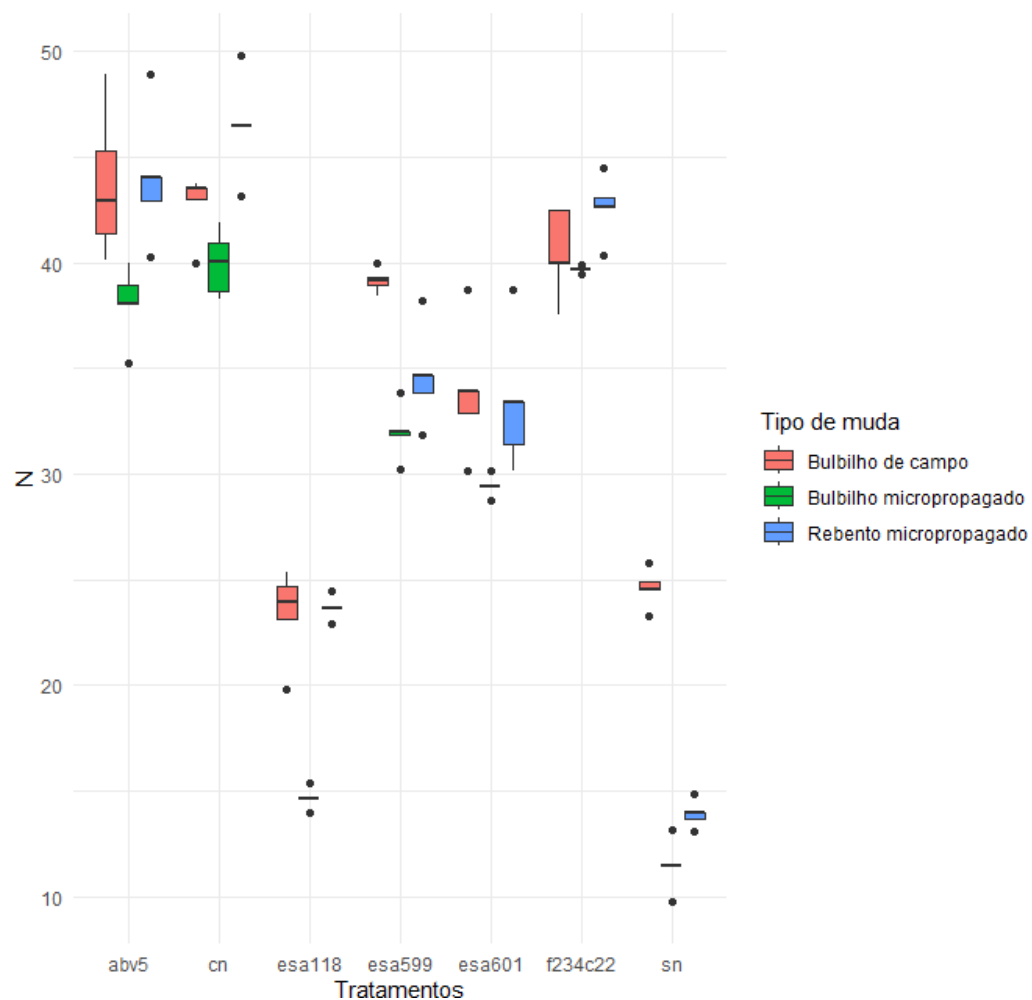
Tratamentos	Bulbilho de campo	Bulbilho micropropagado	Rebento micropropagado
AB-V5	43,72 aA	38,04 aB	44,04 aA
CN	42,75 aB	39,96 aB	46,45 aA
ESA 118	23,38 cA	14,66 cB	23,67 dA
ESA 599	39,12 aA	31,96 bB	34,62 cB
ESA 601	33,91 bA	29,41 bB	33,41 cA
UFRB FA34C2- 2	40,50 aAB	39,67 aB	42,63 bA
SN	24,58 cA	11,45 cB	13,90 eB

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e pelas mesmas letras minúsculas nas colunas pertencem ao mesmo grupo pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

De acordo com o Box-plot, os maiores teores de N concentram-se nos rebentos micropropagados sob CN e AB-V5 (medianas 45-47), seguidos de UFRB FA34C2-2 (43) (Figura 13). Nesses mesmos tratamentos, o bulbilho de campo também apresenta N elevado (41-44), enquanto o bulbilho micropropagado tende a ficar abaixo. Em ESA 599 e ESA 601, observa-se um patamar intermediário (31- 35), no qual o bulbilho de campo não difere

do rebento e ambos apresentam valores significativamente maiores que os do bulbilho micropropagado. Os piores resultados ocorrem em ESA 118 e SN, independentemente do tipo de muda, destacando-se os bulbilhos micropropagados como os mais baixos (medianas 15 em ESA 118 e 12 em SN). A dispersão é moderada e ligeiramente maior nas combinações de melhor desempenho (por exemplo, rebento + CN/AB-V5), sugerindo maior responsividade nessas condições.

Figura 13. Box-plot para o teor de N (N) de mudas de *Agave sisalana*.



O teor foliar de fósforo (P) variou em função da combinação entre tipo de muda e tratamento ($p,0,05$) (Tabela 12). Na comparação intratratamento, em AB- V5 o bulbilho micropropagado apresentou maior P ($3,45 \text{ g kg}^{-1}$) que

o bulbilho de campo e o rebento micropropagado. Em CN e ESA 118 não houve diferença entre tipos. Em ESA 599, o bulbilho micropropagado foi superior ($4,57 \text{ g kg}^{-1}$), seguido do bulbilho de campo e com menor valor do rebento. Em ESA 601 e UFRB FA34C2-2 os tipos não diferiram. No tratamento SN, o bulbilho micropropagado ($2,56 \text{ g kg}^{-1}$) superou o bulbilho de campo e o rebento.

Analisando os tratamentos dentro de cada tipo de muda, no bulbilho de campo o maior teor ocorreu em ESA 599 ($4,10 \text{ g kg}^{-1}$), seguidos por AB-V5, ESA 118, ESA 601 e UFRB FA34C2-2, enquanto CN e SN compuseram o grupo de menores valores (Tabela 12). No bulbilho micropropagado, ESA 599 destacou-se ($4,57 \text{ g kg}^{-1}$), AB-V5 e ESA 601 apresentaram médias intermediárias, seguida de UFRB FA34C2-2 e SN, enquanto que CN e ESA 118 apresentaram os menores teores de P. Entre os rebentos micropropagados, o maior P foi obtido com ESA 601 ($3,15 \text{ g kg}^{-1}$), seguido por AB-V5 e ESA 599, ESA 118 e UFRB FA34C2-2 ficaram em nível inferior, e CN e SN apresentaram os menores valores.

Tabela 12. Valores médios para teor de fósforo (P) de mudas de *Agave sisalana*.

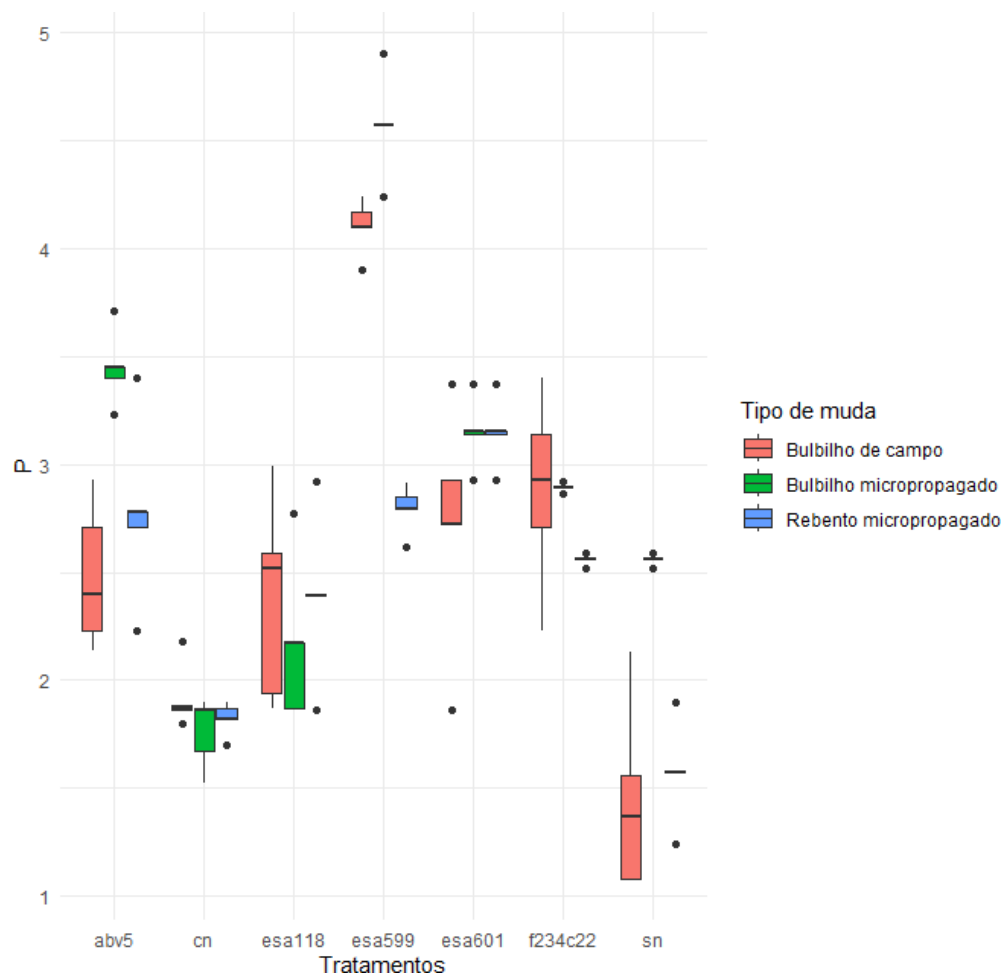
Tratamentos	Bulbilho de campo	Bulbilho micropropagado	Rebento micropropagado
AB-V5	2,48 bB	3,45 bA	2,78 bB
CN	1,92 cA	1,76 dA	1,82 dA
ESA 118	2,38 bA	2,17 dA	2,39 cA
ESA 599	4,10 aB	4,57 aA	2,79 bC
ESA 601	2,72 bA	3,15 bA	3,15 aA
UFRB			
FA34C2- 2	2,88 bA	2,89 cA	2,56 cA
SN	1,44 cB	2,56 cA	1,57 dB

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e pelas mesmas letras minúsculas nas colunas pertencem ao mesmo grupo pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

O Box-plot indica que, os maiores teores de P foliar ocorrem quando o bulbilho micropropagado é combinado com AB-V5 e, sobretudo, com ESA 599 (patamar superior e maior amplitude), seguido por ESA 601 e UFRB FA34C2-2,

nesse tipo de muda, CN e ESA 118 situam-se entre os menores valores (Figura 14). Para rebentos micropropagados, o melhor desempenho aparece em ESA 601, com níveis intermediários em AB-V5, UFRB FA34C2-2 e ESA 599, e mínimos em CN e SN. Entre bulbilhos de campo, destacam-se ESA 599 e UFRB FA34C2-2, com valores intermediários em AB-V5/ESA 601 e baixos em CN e SN. A variabilidade intragrupo é moderada e tende a aumentar nas condições de maior resposta (por exemplo, bulbilho micropropagado + AB-V5/ESA 599), sugerindo maior responsividade nutricional quando as condições são favoráveis.

Figura 14. Box-plot para teor de fósforo (P) de mudas de *Agave sisalana*.



3.1 DISCUSSÃO

As características de arquitetura e vigor, área foliar, altura de planta e diâmetro do pseudocaule, e os acúmulos de biomassa seca (parte aérea, raízes e total) foram fortemente modulados pelos tratamentos, com magnitudes que variaram conforme o tipo de muda (rebento micropropagado, bulbilho micropropagado e bulbilho de campo) (Tabela 1). As variações em clorofila a, b e total, bem como nos teores foliares de N e P, indicam que a eficiência fotossintética e o estado nutricional também respondem ao manejo de acordo com a origem do material propagativo (GARCÍA et al., 2019; JARQUÍN-ROSALES et al., 2022).

A inoculação com estirpes de bactérias diazotróficas estimulou crescimento, índice de clorofila e nutrição do sisal, com resultados semelhantes ou superiores à fertilização nitrogenada mineral. Em diversas culturas, *Azospirillum brasilense* (incluindo Ab-V5/Ab-V6) eleva clorofila, estado nutricional e biomassa, inclusive sob baixa disponibilidade de N, por mecanismos como produção de AIA, modulação da morfogênese radicular, aumento da área de absorção e melhoria da eficiência de uso do nitrogênio (ZEFFA et al., 2019; HUNGRIA et al., 2022). Meta-análises e estudos recentes corroboram ganhos em massa de raízes, acúmulo de nutrientes na parte aérea e produtividade (OLIVEIRA et al., 2023; BARBOSA et al., 2022). No presente estudo, Ab-V5 maximizaram área foliar, clorofila a e total, massa seca da parte aérea e, em muitas condições (Tabela 3, 5 8 e 10) e massa seca total, especialmente em rebento) (Tabela 7), efeito que sinaliza acoplamento entre área fotossintética, pigmentos e acúmulo de biomassa.

O índice de clorofila mostra-se com um indicador útil do estado nutricional de N e de maior rendimento (SILVA et al., 2014; LIU et al., 2019; BRAULIO et al., 2020; BRAULIO et al., 2021). Como o N participa intensamente da síntese de clorofila e de processos fotossintéticos, sua disponibilidade impacta diretamente o crescimento (MATOSO et al., 2020). Em Ab-V5, os rebentos apresentaram clorofila a superior aos bulbilhos (Tabela 8), esse ganho pigmentário veio acompanhado de maior área foliar e massa seca da parte aérea (Tabela 2 5). Sob Ab-V5 e UFRB FA34C2-2, a vantagem dos rebentos foi consistente, sugerindo

acoplamento funcional entre N foliar, eficiência do aparato fotossintético e expansão do dossel, culminando em maior biomassa (VUORINE et al., 2021).

Iftikhar et al. (2018) observaram crescimento mais rápido em plantas propagadas por rebentos versus bulbilhos. A maior influência de UFRB FA34C2-2 provavelmente envolve mecanismos não mensurados nesse estudo, como FBN, solubilização de fosfato, síntese de AIA e produção de exopolissacarídeos (Sousa, 2017; BRAULIO et al., 2021). Em Latossolo Amarelo distrófico, UFRB FA34C2-2 elevou número de folhas, índice de clorofila, biomassa de parte aérea e raiz, e acúmulos de N e P na parte aérea, superando N mineral (BRAULIO et al., 2020).

O fornecimento de N mineral apresentou desempenho intermediário no conjunto de variáveis, favorecendo especialmente bulbilhos (notadamente de campo) em crescimento e biomassa, em rebentos, elevou N foliar (Tabela 11), mas com redução de altura e área foliar (Tabela 2 e 3). Na ausência de bioestímulos de PGPB, materiais com reservas iniciais e sistema radicular pré- formado (bulbilhos de campo) exploram melhor o substrato e exibem maior eficiência morfofuncional para transformar N em estrutura (SALINAS-BONILLO et al., 2023).

Já nos rebentos, o ganho de N foliar nem sempre se traduziu integralmente em expansão de tecidos, possivelmente por limitações de aclimatação radicular, balanço hídrico ou cofatores nutricionais necessários à expansão celular. O N estimula biomassa, área foliar e taxa fotossintética (ALVES et al., 2018), o que foi observado quando a inoculação elevou as médias em relação ao não inoculado. O efeito do N a 240 mg/vaso aos 150 DAP decorre da rápida disponibilidade do nutriente, essencial no início do crescimento, com papel em síntese hormonal, divisão e crescimento celular (MARSCHNER, 2012).

Entre as estirpes, UFRB FA34C2-2 e Ab-V5 (*A. brasilense*) destacam-se entre os tratamentos de melhor desempenho, superando o N mineral (CN) em várias combinações de variável e tipo de muda, com destaque para área foliar em rebentos, massa seca da parte aérea em bulbilho micropropagado e rebentos, e massa seca da raiz nos três tipos de mudas (Tabelas 3, 5, 6), á para altura e teor de N na parte aérea, a superioridade não foi universal,

pois CN manteve desempenho igual ou superior em alguns tipos de muda (Tabelas 2 e 11).

A superioridade ao N mineral pode indicar suprimento contínuo de N por Ab-V5 e UFRB FA34C2-2 longo do tempo, ao passo que o N mineral teria sido rapidamente absorvido e metabolizado sem reposição. Esses resultados sugerem capacidade de colonização e sobrevivência no substrato e possivelmente na rizosfera, com benefício prolongado durante o cultivo (HUNGRIA et al., 2010; FUKANI et al., 2016; HUNDRIA et al., 2016; HUNGRIA et al., 2018; FUKAMI et al., 2017; FUKAMI et al., 2018).

O desempenho intermediário de *Bacillus* spp. (ESA 599) e *Paenibacillus* sp. (ESA 601) indica efeito benéfico, porém menos intenso que Ab-V5 e UFRB FA34C2-2, enquanto que, ESA 118 e SN apresentaram baixos valores em praticamente todas as métricas, denotando manejos pouco responsivos às exigências iniciais do sisal em viveiro. Em particular, ESA 599 e ESA 601 promoveram ganhos em mudas micropropagadas e rebentos, superando o N mineral em massa seca da parte aérea (rebentos e bulbilhos micropropagados), massa seca de raiz (três tipos de muda) massa seca total (rebentos e bulbilhos micropropagados) (Tabelas 5, 6 e 7) e diâmetro do pseudocaulo (bulbilho de campo e rebentos) (Tabela 4).

Para bulbilho de campo, a massa seca total sob N mineral foi semelhante à de ESA 601 e superior à de ESA 599 (Tabela 7). Esses resultados são compatíveis com múltiplos mecanismos (FBN, AIA, sideróforos, solubilização de fosfato) relatados para as estirpes (NASCIMENTO et al., 2021). Nesse contexto, Nascimento et al. (2021) reportaram acúmulo de N na parte aérea superior ao controle sem inoculação e aumento de massa de raízes em plantas inoculadas com *A. brasilense*. *Paenibacillus* spp. apresentam capacidade de FBN e promoção de crescimento em arroz, trigo e feijão-caupi, com relatos pontuais de nodulação (COSTA et al., 2013). Em sisal, comunidades com *Bacillus*, *Paenibacillus* e *Rhizobium* têm potencial para formulação de bioestimulantes (SANTOS et al., 2019), o que reforça a inoculação como biotecnologia de baixo custo para sistemas semiáridos.

Quanto aos tipos de mudas, emergiram papéis complementares. Rebentos micropropagados maximizaram atributos do aparato fotossintético e do vigor aéreo (AF, clorofila a e altura) quando combinados a Ab-V5 e UFRB FA34C2-2, coerente com efeitos de PGPB sobre pigmentos e expansão foliar. Bulbilhos de campo, por sua vez, atingiram maiores massas de raiz e, em vários tratamentos, massa seca total (Tabelas 6 e 7), indicando maior alocação para raízes e capacidade de exploração do substrato, característica esperada de propágulos com reservas e estruturas previamente diferenciadas (SHU et al., 2024).

O bulbilho micropropagado tendeu a ocupar posição inferior para diâmetro do pseudocaule, área foliar, massa seca de raízes e massa seca total (Tabelas 3, 4, 6 e 7) compatível com limitações de aclimação *ex vitro* (ajustes anatômico- fisiológicos de raízes, estômatos e balanço hídrico) até a consolidação do sistema radicular (BAUTISTA-MONTES et al., 2022). Em MSR, a hierarquia bulbilho de campo > rebento > bulbilho micropropagado prevaleceu na maioria dos tratamentos (Tabela 6), em consonância com o efeito de PGPB em expandir a superfície radicular via AIA e sinais rizosféricos, e com a vantagem estrutural do bulbilho de campo na emissão/espessamento de raízes (GILCK, 2012). Em *Agave*, endófitos/PGPB (incluindo *Rhizobium*, *Bacillus*, *Pseudomonas*) já foram associados a ganhos de crescimento, açúcares e sanidade (MARTÍNEZ- RODRÍGUEZ et al., 2015; MARANTO-GÓMEZ et al., 2025; PACHECO-RAMÍREZ et al., 2024).

Os boxplots indicaram que inoculantes PGPB elevaram N foliar, clorofilas, área foliar e biomassa frente ao controle não inoculado (Figura 11), alinhados à expectativa de maior eficiência fotossintética e acúmulo de carbono (TAIZ et al., 2017). Contudo, como o tratamento com N mineral também apresentou alto N foliar, esses gráficos sustentam melhora da nutrição nitrogenada, mas não permitem atribuir a fonte de N exclusivamente à FBN.

Otimizar o estabelecimento de *A. sisalana* envolve combinar inoculantes mais responsivos (Ab-V5, UFRB FA34C2-2) com o tipo de

muda adequado aos objetivos, rebentos para acelerar o aparato fotossintético (área foliar, clorofila a e massa seca da parte aérea) e bulbilhos de campo quando a prioridade for robustez radicular e massa seca total. Tratamentos intermediários (ESA 599, ESA 601) podem ser úteis sob condições menos exigentes, enquanto ESA 118 e SN demandam cautela.

As plantas provenientes de bulbilho de campo, bulbilho micropropagado e rebento micropropagado responderam significativamente à inoculação (UFRB FA34C2-2, Ab-V5, ESA 599, ESA 601), com incrementos de biomassa em relação ao sem inoculação e sem fertilização de N mineral, houve ainda melhora de P foliar em combinações com ESA 599 (especialmente no bulbilho micropropagado) e com ESA 601 (em rebentos) (Tabela 12). Em N foliar, os maiores patamares concentraram-se em rebentos sob N mineral e Ab-V5, enquanto ESA 599 e ESA 601 mantiveram níveis intermediários (Tabela 11). Assim, a inoculação reduz a dependência de adubação mineral, sem eliminá-la, e o ajuste nutricional deve considerar o tipo de muda e o inoculante empregado, contribuindo para a sustentabilidade agrícola ao elevar a eficiência de uso do nitrogênio, mitigar perdas e custos com fertilizantes e fortalecer a resiliência produtiva em condições semiáridas.

4.0 CONCLUSÕES

A inoculação com bactérias promotoras de crescimento, especialmente *Azospirillum brasilense* (Ab-V5) e UFRB FA34C2-2, eleva clorofilas, nutrição nitrogenada e biomassa de *Agave sisalana*, igualando ou superando a adubação nitrogenada mineral a depender da variável e do tipo de muda.

Rebentos maximizam rapidamente o aparato fotossintético (área foliar, clorofila e massa aérea) e os bulbilhos de campo priorizaram raízes e, com frequência, a massa seca total.

A adoção de inoculantes reduz a dependência de N mineral e contribui para a sustentabilidade agrícola no semiárido, aumentando a eficiência de uso do N, reduzindo custos e fortalecendo a resiliência

produtiva.

5.0 REFERÊNCIA

ALVES, A. C.; JESUS, F. N.; ALVES, P. B.; SANTOS, H. V.; SOUZA, G. S.; SANTOS, A. R. Biomass production and essential oil of lemon balm cultivated under colored screens and nitrogen. **Horticultura Brasileira**, v. 36, p. 94-99, 2018.

BAUTISTA-MONTES, E.; HERNÁNDEZ-SORIANO, L.; SIMPSON, J. Advances in the Micropropagation and Genetic Transformation of Agave Species. **Plants**, v. 11, n. 13, p. 1757, 2022.

SALINAS-BONILLO, M. J.; TORRES-GARCIA, M. T.; PANIAGUA, M. M.; SÁNCHEZ, M. M.; CABELLO, J. Clonal mechanisms that matter in Agave fourcroydes and A. sisalana invasions in drylands: implications for their management. **Management of Biological Invasions**, v. 14, n. 1, p. 80-97, 2023.

BRAULIO, C. S.; SILVA, L. F.L.; SILVA, C. S.; CORREIA, A. J.; ROCABADO, J. M. A.; NOBREGA, R.S.A Can inoculation with diazotrophic bacteria decrease the productivity loss of defoliated *Vigna unguiculata* (L.) Walp? **Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering**, v. 25, p. 189-196, 2021.

BRAULIO, C.S.; NÓBREGA, R.S.A.; SILVA, L.C.V.; CORREIA, A.J.; SOUSA, C.B.C.; PEREIRA, E.G. Inoculation of diazotrophic bacteria in chicory. **Horticultura Brasileira** 38: 185-191, 2020.

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

FUKAMI, J.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S.; HUNGRIA, M. Accessing inoculation methods of maize and wheat with *Azospirillum brasilense*. **AMB Express**, v. 6, p. 1-13, 2016.

FUKAMI, J.; OLLERO, F. J.; MEGÍAS, M.; HUNGRIA, M. Phytohormones and induction of plant-stress tolerance and defense genes by seed and foliar inoculation with *Azospirillum brasilense* cells and metabolites promote maize growth. **AMB Express**, v. 7, p. 153, 2017.

FUKAMI, J.; ABRANTES, J. L. F.; DEL CERRO, P.; NOGUEIRA, M. A.; OLLERO F. J.; MEGÍAS, M.; HUNGRIA M. Revealing different strategies of quorum sensing in *Azospirillum brasilense* strains Ab-V5 and Ab-V6. **Arch Microbiol**, v. 200, p. 47–56, 2018.

GARCÍA, H. C.; ÁNGELES, G. V. C.; VALLE, J. R. E.; ORTIZ, G. R. VELASCO, V. A. V. Development of micropropagated plants of *Agave americana* var. *Oaxacensis* during greenhouse acclimatization. **Revista Mexicana Ciencias Agrícolas**, v. 10, n. 7, 2019.

GLICK, B. R. Plant Growth-Promoting Bacteria: Mechanisms and Applications. **Scientificav**, 2012, p. 963401, 2012.

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

HUNGRIA, M.; RIBEIRO, R.A.; NOGUEIRA, M.A. Draft genome sequences of *Azospirillum brasilense* strains Ab-V5 and Ab-V6, commercially used in inoculants for grasses and legumes in Brazil. **Genome Announcements**, v. 17, p. 20, 2018.

HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; SOUZA, E. M.; PEDROSA, F. O. Inoculation with selected strains of *Azospirillum brasilense* and *A. lipoferum* improves yields of maize and wheat in Brazil. **Plant Soil**, v. 331, p. 413-425, 2010.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S. 2016. Inoculation of *Brachiaria* spp. with the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*: an environment-friendly component in the reclamation of degraded pastures in the tropics. **Agric Ecosyst Environ**, v. 221, p. 125-131, 2016.

JARQUÍN_ROSALES, D.; VALLE, J. R. E.; ALPUCHE-OSORNO, J. J.; RODRÍGUEZ-ORTIZ, G.; MARTIN, M. P.; CAMPO-ANGELES, G. V. The effects of fertirrigation and *Azospirillum brasilense* inoculation on photosynthetic compounds of *Agave angustifolia*. **Australian Journal of Crop Science**, v. 16, n. 01, p. 162-168, 2022.

LIU, X.; LI, Q.; LI, Y.; GUAN, G.; CHEN, S. *Paenibacillus* strains with nitrogen fixation and multiple beneficial properties for promoting plant growth. **PeerJ**, v. 7, p. 74-85, 2019.

MARANTO-GÓMEZ, V. M.; RINCÓN-MOLINA, C. I.; MANZANO-GÓMEZ, L. A.; GEN-JIMÉNEZ, A.; MALDONADO, J. C.; VILLALOBOS-MALDONADO, J. J.; RUIZ-VALDIVIEZO, V. M.; ROSALES, R. R.; RINCÓN-MOLINA, F. A. Plant Probiotic Potential of Native Rhizobia to Enhance Growth and Sugar Content in *Agave tequilana* Weber var. Blue. **Horticulturae**, v. 11, n. 2, p. 137, 2025.

MARTÍNEZ-RODRÍGUEZ, J.; MORA-AMUTIO, M. D.; PLASCENCIA-CORREA, L. A.; AUDELO-REGALADO, E.; GUARDADO, F. R.; HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ, E.; PEÑA-RAMÍREZ, Y.; ESCALANTE, A.; BELTRÁN-GARCÍA, m. J.; OGURA, T. Cultivable endophytic bacteria from leaf bases of *Agave tequilana* and their role as plant growth promoters. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 45, n. 4, p. 1333-1339, 2015.

MARSCHNER, P. Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3ed. **Academic Press**. 649, 2012.

MATOSO, E. S.; AVANCINI, A. R.; MACIEL, K. F. K.; ALVES, M. C.; SIMON, E. D. T.; SILVA, M. T.; DIAS, N. L.; SILVA, D. A. S. Influência do uso de um mix de bactérias diazotróficas na biometria e no conteúdo de clorofila de plantas de cana-de-açúcar. **Brazilian Journal de Development**, v. 6, p. 7261-7274, 2020.

NASCIMENTO, R. J.; CAVALCANTI, M. I. P.; CORREIA, A. J.; ESCOBAR, I. E. C.; FREITAS, D. S.; NÓBREGA, R.S.A.; FERNANDES-JÚNIOR, P.I. Maize-associated bacteria from the Brazilian semiarid region boost plant growth and grain yield. **Symbiosis**, v. 83, p. 347–359, 2021.

OLIVEIRA, C. E. S.; JALAL, A.; VITÓRIA, L. S.; GIOLO, V. M.; OLIVEIRA, T. J. S. S.; AGUILAR, J. V.; CAMARGOS, L. S.; BRAMBILLA, M. R.; FERNANDES, G. C.; VARGAS, P. F.; ZOZ, T.; TEXEIRA FILHO, M. C. M. Inoculation with *Azospirillum brasilense* Strains Ab-V5 and AbV6 Increases Nutrition, Chlorophyll, and Leaf Yield of Hydroponic Lettuce. **Plantas**, v. 12, n. 17, p. 3107, 2023.

PACHECO-RAMÍREZ, C. E.; PRADO-GUZMÁN, I. S.; NAVARRETE-BOLAÑOS, J. L.; ORTEGA, F. V.; GARCÍA-RODRÍGUEZ, Y, M.; ROJAS-SOLIS, D.; CASTELÁN-SÁNCHEZ, H. G.; SANTOYO, G.; OROZCO-MOSQUEDA, M. C. Analysis of novel volatile compounds, plant-beneficial traits, and genomic features of the endophyte *Bacillus velezensis* ITCE1 and its crosstalk with *Trichoderma*. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, v. 140, p. 102867, 2025.

SHU, F.; WANG, D.; SARSAIYA, S.; JIN, L.; LIU, K.; ZHAO, M.; WANG, X.; YAO, Z.; CHEN, G.; CHEN, J. Bulbil initiation: a comprehensive review on resources, development, and utilisation, with emphasis on molecular mechanisms, advanced technologies, and future prospects. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1343222, 2024.

R Core Team (2025). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. <<https://www.R-project.org/>>.

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

VOURINNE, I.; HEISKANEN, J.; PELLIKKA, P. K. E. Assessing Leaf Biomass of *Agave sisalana* Using Sentinel-2 Vegetation Indices. **Remote Sensing**, v. 13, n. 2, p. 233, 2021.

ZEFFA, D. M.; PERINI, L. J.; SILVA, M. B.; SOUSA, N. V.; SCAPIM, C. A.; OLIVEIRA, A. L. M.; AMARAL JÚNIOR, A. T.; GONÇALVES, L. S. A. *Azospirillum brasilense* promotes increases in growth and nitrogen use efficiency of maize genotypes. **PLoS ONE**, v. 14, n. 4, p. e0215332, 2019.

Informações complementares

Tabela 14. Caracterização química do composto orgânico preparado a partir de esterco bovino e caprino e podas de árvores.

Atributo químico	Composto orgânico
pH (H ₂ O)	7,2
Umidade (Resíduo Orgânico) 60 - 65°C	28,25 %
Matéria Orgânica Total (Combustão)	16,12 %
Nitrogênio Total	0,60 %
Fósforo (P ₂ O ₅) total	1,36 %
Potássio (K ₂ O) total	0,75 %
Cálcio (Ca) total	0,98 %
Magnésio (Mg) total	0,26 %
Enxofre (S) total	0,07 %
Cobre (Cu)	17 mg kg ⁻¹
Manganês (Mn)	108 mg kg ⁻¹
Zinco (Zn)	34 mg kg ⁻¹
Boro (B)	255 mg kg ⁻¹
Sódio (Na)	424 mg kg ⁻¹

Bactérias promotoras de crescimento e doses de nitrogênio induzem o crescimento de mudas micropropagadas de *Agave Sisalana* sob restrição hídrica

Resumo: Entre os maiores problemas no cenário atual destacam-se os efeitos climáticos e o consequente impacto na agricultura, sobretudo decorrentes da redução da disponibilidade hídrica. A restrição hídrica é um fator limitante no crescimento das plantas, responsável por causar modificações morfofisiológicas e alterar a produtividade. O sisal é uma cultura perene, cultivada para extração da principal fibra dura e natural comercializada no cenário mundial. A inoculação de plantas por rizobactérias promotoras do crescimento pode remodelar o sistema radicular, mitigando os efeitos do déficit hídrico. Com isso, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de três estirpes de bactérias promotoras de crescimento e doses de nitrogênio na mitigação do estresse hídrico, na indução do crescimento de mudas micropropagadas de sisal. O experimento foi conduzido em casa de vegetação sob condições controladas de temperatura e umidade. Os tratamentos foram constituídos por três estirpes de bactérias promotoras de crescimento: *Bacillus subtilis* BS24 e *Azospirillum brasilense* Ab-V5 e mais uma fase de teste da UFRB FA34C2-2, um tratamento sem inoculação com dois níveis de adubação nitrogenada, 90N (180 Kg ha⁻¹ N) e 45N (24 Kg ha⁻¹ N), tendo como fonte de N a ureia e duas condições hídricas contrastantes (irrigado e déficit hídrico). O teor de água no solo foi monitorado diariamente, com auxílio de sensores de umidade modelo GB Reader N1535 (Measurement Engineering, Austrália). Foram avaliadas diferentes características morfofisiológicas. A inoculação com bactérias promotoras de crescimento e a dose mais elevada de nitrogênio, contribui para a mitigação de déficit hídrico nas mudas micropropagadas de sisal em condições controladas.

Palavras chaves: sisal; seca; nitrogênio; características de crescimento.

Growth-promoting bacteria and nitrogen doses induce the growth of micropropagated *Agave Sisalana* seedlings under water restriction.

Abstract: Among the biggest problems in the current scenario are the effects of climate change and the consequent impact on agriculture, particularly due to reduced water availability. Water stress is a limiting factor in plant growth, causing morphophysiological changes and affecting productivity. Sisal is a perennial crop cultivated for the extraction of the main hard, natural fiber commercialized worldwide. Inoculating plants with growth-promoting rhizobacteria can remodel the root system, mitigating the effects of water stress. Therefore, the objective of this study was to evaluate the effect of three strains of growth-promoting bacteria and nitrogen doses in mitigating water stress and inducing the growth of micropropagated sisal seedlings. The experiment was conducted in a greenhouse under controlled temperature and humidity conditions. The treatments consisted of three strains of growth-promoting bacteria: *Bacillus subtilis* BS24 and *Azospirillum brasilense* Ab-V5. Another test phase from UFRB FA34C2-2 was a treatment without inoculation with two levels of nitrogen fertilization: 90N (180 kg ha⁻¹ N) and 45N (24 kg ha⁻¹ N), with urea as the N source and two contrasting water conditions (irrigated and water deficit). Soil water content was monitored daily using GB Reader N1535 soil moisture sensors (Measurement Engineering, Australia). Various morphophysiological characteristics were evaluated. Inoculation with growth-promoting bacteria and the higher nitrogen dose contributes to the mitigation of water deficit in micropropagated sisal seedlings under controlled conditions.

Keywords: sisal; drought; nitrogen; growth characteristics.

1. INTRODUÇÃO

Agave Sisalana é uma planta suculenta, amplamente cultivada em regiões áridas e semiáridas no mundo, suas folhas são utilizadas para extração da fibra de sisal. O cultivo de Sisal é socioeconomicamente relevante para o semiárido brasileiro, por fornecer, direta e indiretamente, a principal fonte de renda, para uma população de mais de 850.000 pessoas, onde frequentemente é o único produto agrícola disponível, por isso, desempenha um papel fundamental na subsistência e no desenvolvimento econômico dessa região. (MONJA-MIO et al., 2019; RAYA et al., 2023).

O Brasil é o maior produtor mundial de sisal, com uma participação de 44,7% no total produzido, seguido por Tanzânia (16,4%), Quênia (10,3%), Madagascar (8,0%), China (6,4%), entre outros. Ainda de acordo com a FAO, só no primeiro semestre de 2023 o Brasil exportou sisal para 72 países, entre os principais destinos do sisal exportado destacam-se a China e os Estados Unidos, com respectivas participações de 56,0% e 19,5% na quantidade exportada, seguidos por Portugal (6,0%), México (2,0%), Canadá (1,9%) (FAO, 2024).

A produção de sisal é influenciada por diversos fatores estressantes, tanto bióticos quanto abióticos, sendo a restrição hídrica o principal elemento que limita a produtividade da cultura. As mudanças climáticas é um dos maiores desafios enfrentados pela humanidade, impactando diversos setores da sociedade, especialmente a agricultura. Isso porque a agricultura depende de fatores como temperatura e chuva, que estão cada vez mais imprevisíveis devido às mudanças no clima. Essas variações podem prejudicar o desenvolvimento econômico e coloca em risco a subsistência de muitas comunidades que dependem do campo para viver (PAIVA et al., 2021; FONSECA et al., 2020; RAYA et al., 2022; ADMASSIE et al., 2022).

De acordo com o último relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), divulgado em 2023, é possível afirmar que as atividades antropogênicas, sobretudo por meio das emissões de gases de efeito estufa, têm causado de forma inequívoca o aquecimento global. Nesse contexto, a temperatura média da superfície terrestre atingiu um valor

1,1°C superior ao

registrado no período de 1850 a 1900, entre os anos de 2011 e 2020 (IPCC, 2023).

As Pesquisas indicam que o déficit hídrico ocasiona a redução do período de crescimento e desenvolvimento das plantas, resultando, conseqüentemente, em uma diminuição na produtividade agrícola. Nesse contexto, torna-se fundamental a realização de estudos voltados à maximização da produtividade aliada a biotecnologia sustentável, principalmente em regiões com condições de disponibilidade hídrica limitada ((PAIVA et al., 2021; FONSECA et al.,2020; RAYA et al., 2022; KOZA et al., 2022; ADMASSIE et al., 2022; RAYA et al., 2023).

Ambientes semiáridos e áridos ocupam aproximadamente 40% da superfície terrestre, com mais de 30% da população humana vivendo nessas regiões, que estão entre as pessoas mais pobres e marginalizadas da Terra. A região semiárida brasileira, conhecida como bioma Caatinga, corresponde aproximadamente a 10% do território do país (IBGE SIDRA, 2015). Este bioma apresenta precipitações irregulares e temperaturas médias de até 32 °C em algumas áreas (INMET, 2018).

Nos últimos anos, tem havido um interesse crescente em maximizar o uso de materiais vegetais de *Agave Sisalana*, visto que a maior parte de sua biomassa pré e pós-produção é desperdiçada (PÉREZ-ZAVALA et al., 2020). Estudos indicam potencial do sisal, para ser utilizado na produção de etanol. No Brasil, especialmente na região do semiárido baiano, onde o sisal é cultivado, a iniciativa de aproveitar a planta para a produção de etanol visa diversificar a matriz energética e gerar novas fontes de renda para os produtores locais (DE PAULA et al., 2012 ; SANTOS et al., 2015 ; PÉREZ-ZAVALA et al., 2020).

O potencial energético de sua biomassa é comparável ao da cana-de-açúcar, com a vantagem de demandar 80% menos irrigação e uso de fertilizantes. Em cinco anos, a cultura do agave rende, por hectare, a produção de 880 toneladas de biomassa, armazena 617 toneladas de água e captura 385 toneladas de carbono. Hoje, o Brasil é o maior produtor de fibra de sisal do mundo, com cerca de 80 mil toneladas por ano, no entanto, apenas 5% da planta é aproveitado (RAYA et al., 2023).

Para ampliar a possibilidade de cultivo em áreas que sofrem com restrição hídrica, o uso de BPCV em mudas micropropagadas na agricultura oferece uma oportunidade sustentável de proteger o rendimento das culturas (SILVA et al., 2016; FANG et al., 2018; SILVA et al., 2018; LIU et al., 2019; FONSECA et al., 2020), seja em condições favoráveis ou não, devido ao seu efeito benéfico sobre a fertilidade do solo e as diversas estratégias oferecidas por esses organismos para melhorar as respostas das plantas contra estresses abióticos (FONSECA et al., 2020; ADMASSIE et al., 2022).

A inoculação destes microrganismos promove o crescimento vegetal (clorofilas, aumento de área foliar, crescimento radicular, massas secas das plantas e nutrição) através da melhoria do *status* nutricional (BRAULIO et al., 2020; SOUSA et al., 2022; MOREIRA et al., 2023). Isto se dá em função de várias funções importantes que são capazes de realizar tais como: a produção de fitohormônios, antibióticos, ácido hidrocianico, enzimas líticas, sideróforos (SILVA et al., 2018), solubilização de nutrientes, fixação de nitrogênio (COSTA et al., 2016; MARINHO et al., 2017; LEE et al., 2019; RODRIGUES et al., 2022; SOUSA et al., 2022) e proteção a condições adversas (GUIMARÃES et al., 2017; FUKAMI, CERZINI e HUNGRIA, 2018; SANTOS et al. 2018; COELHO et al., 2019; SANTOS et al., 2019; MOLINA et al. 2021).

Os gêneros *Bacillus*, e *Azospirillum* estão entre as rizobactérias mais estudadas, principalmente em pesquisas relacionadas a mitigação do estresse hídrico (ARMADA et al., 2014). O *Azospirillum brasilense* é uma bactéria cuja participação na tolerância à seca tem sido amplamente documentada em diversos estudos. Essa associação microbiana promove melhorias nas características morfológicas das plantas, incluindo o aumento da ramificação radicular, a elevação da biomassa radicular e a maior densidade de pelos radiculares. Tais alterações contribuem para uma exploração mais eficiente do perfil do solo em busca de água, potencializando a resistência das plantas às condições de estresse hídrico (FUKAMI et al., 2017; PAIVA et al., 2021).

O gênero *Bacillus* possui diversos mecanismos para lidar com a restrição hídrica, incluindo a promoção do crescimento de plantas e a

indução de resistência a estresse. Estes mecanismos envolvem a produção de substâncias que aumentam a hidratação das raízes, a regulação de fitormônios e enzimas, e a produção de compostos com efeitos nematicidas e fungicidas. Além disso, espécies de *Bacillus* podem produzir endósporos, estruturas de resistência que permitem a sobrevivência em condições adversas, como a seca (HASHEM et al., 2019).

Neste estudo, foi avaliado o efeito de bactérias promotoras de crescimento tipos de propágulos e doses de nitrogênio mineral no crescimento de mudas micropropagadas de *Agave sisalana* sob restrição hídrica.

2. MATERIAL e MÉTODOS

2.1 Arranjo experimental e condições de cultivo

Os experimentos foram conduzidos de forma simultânea em estufa do Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas (CCAAB) na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), localizado no município de Cruz das Almas – BA, segundo coordenadas geográficas latitudes 12°40'19"S e longitude 39°06'23"O. Durante a condução do experimento a temperatura da casa de vegetação foi de $30,3 \pm 0,8$ °C.

O experimento foi instalado no delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 2 x 5 x 3, 2 tipos de mudas (rebento micropropagado e bulbilho micropropagado), 5 bactérias (ABV5 (*Azospirillum brasilense*), BS24 (*Bacillus subtilis*), F234C22, 45N, 90N) e 3 condições hídrica (cc, 45, 90), com 5 repetições.

Os tratamentos foram constituídos por três estirpes de bactérias promotoras de crescimento, das quais, duas foram provenientes da Coleção de Microrganismos de Interesse Agrícola da Embrapa Semiárido (CMISA): *Bacillus subtilis* BS24 e *Azospirillum brasilense* Ab-V5, isolada por Hungria et al, (2010) e autorizada para uso na cultura do milho pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), e mais uma estirpe em fase de teste da UFRB FA34C2-2 (Souza, 2017), um tratamento sem inoculação com dois níveis de adubação nitrogenada, 90N (180 Kg ha^{-1}

N) e 45N (24 Kg ha⁻¹ N), tendo como fonte de N a ureia e duas condições hídricas contrastantes (irrigado e déficit hídrico).

Os inoculantes foram preparados com o cultivo dos isolados no meio de cultura Dyg's líquido por 4 dias, a 25 °C, com agitação orbital a 120 rpm, obtendo-se a fase log de crescimento, com 10⁸ UFC mL⁻¹. O meio de cultura utilizado foi o MS (Murashige e Skoog, 1962) com a metade das concentrações dos sais (MS 1\2), suplementado com o regulador de crescimento BAP (6-benzilaminopurina) na concentração de 53,28 µM, adicionado 87,0 mM sacarose e solidificado com 0,7% de ágar, segundo o protocolo de Garcia et al. (2015). A fase de multiplicação foi constituída de cinco ciclos de subcultivos no período de 60 dias (Fonseca, 2020).

Após o período de multiplicação *in vitro* foram selecionadas plântulas com aproximadamente 1,9 g de matéria fresca, sendo estas transferidas para tubetes com amostra de um Latossolo Amarelo distrocoeso, coletado no campus da UFRB, a 0,20 m de profundidade e mantidas em casa de vegetação. O solo apresentou as seguintes caracterização químicas e físicas: pH (H₂O): 6,0; MO: 12,8 g dm⁻³, P (Mehlich-1): 10,5 mg dm⁻³, K⁺: 67,7 mg dm⁻³, Ca²⁺: 0,7 cmolc dm⁻³, Mg²⁺: 0,3 cmolc dm⁻³, (H+Al): 2,0 cmolc dm⁻³, SB: 1,2 cmolc dm⁻³, CTC efetiva: 1,2 cmolc dm⁻³, CTC potencial: 3,2 cmolc dm⁻³, V: 37,5%, Zn²⁺: 5,05 mg dm⁻³, Fe²⁺: 49,05 mg dm⁻³, Mn²⁺: 9,1 mg dm⁻³, Cu²⁺ :1,6 mg dm⁻³ e B: 0,28 mg dm⁻³; Areia: 533g kg⁻¹; Silte: 280 g kg⁻¹; Argila: 182g kg⁻¹.

As plântulas nos tubetes foram aclimatadas em telado com tela de sombreamento 50% na parte superior e nas laterais e irrigação por aspersão automatizada. O período de irrigação foi de 10 minutos por dia, em dias alternados, com lâmina d'água de 2,0 mm. As plantas permaneceram em tubetes na casa de vegetação por período de 60 dias, após esse período as plantas foram transferidas para vasos de 4,0 dm³ preenchidos com Latossolo Amarelo distrocoeso e foram inoculadas (2 mL das suspensões bacterianas).

O teor de água no solo foi monitorado diariamente entre 09h00 e 15h00, com auxílio de sensores de umidade modelo GB Reader N1535

(Measurement Engineering, Austrália) instalados no centro de cada vaso, com auxílio de um trado de rosca, a uma profundidade de 20 cm. Todos os tratamentos foram mantidos em capacidade de campo (CC) (tensão de água no solo de -18 kPa) durante o período que antecedeu a imposição do estresse. Foi imposto o déficit hídrico por um período de 90 dias nos tratamentos que sofreram a restrição hídrica. Neste tratamento, a tensão de água no solo foi reduzida para -138 kPa, que corresponde a aplicação de 50% da água disponível no solo. O tratamento irrigado não recebeu alteração na condição hídrica, mantendo a capacidade de campo. Os cálculos de reposição de água foram realizados com o auxílio de uma planilha eletrônica, feita em função da curva de retenção de água do solo.

2.2 Características morfofisiológicas

Ao final da imposição da restrição hídrica nas plantas, com o objetivo de obter dados dos tratamentos totalmente irrigados, parcialmente estressados (45 dias após a imposição do déficit hídrico) e no estresse máximo (90 dias após a imposição) Cinco plantas de cada tratamento foram avaliadas quanto ao número de folhas (NF), largura da folha (LF), altura da parte aérea (H), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), massa seca total (MST), área foliar (AF), taxa assimilatória líquida (TAL), índice de clorofila a (ICFa), índice de clorofila b (ICFb) e índice de clorofila total (ICFt).

2.3 Análise Estatística

Os dados foram submetidos ao teste F da análise de variância. As médias dos tipos de mudas e c hídrica foram comparados pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e as médias das bacterias foram agrupados pelo teste de Scott- Knott a 5% de probabilidade.

As análises foram realizadas com auxílio do programa estatístico R (R Core Team, 2025).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância (ANAVA) indicou efeito significativo dos fatores principais ($p < 0,01$) tipo de muda, inoculação bacteriana e condição hídrica para todas as variáveis avaliadas, número de folhas (NF), largura da folha (LF), altura da parte aérea (H), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), massa seca total (MST), área foliar (AF), taxa assimilatória líquida (TAL), índice de clorofila a (ICFa), índice de clorofila b (ICFb) e índice de clorofila total (ICFt) (Tabela 1). A significância da interação evidencia que a resposta das plantas depende da combinação entre o material propagativo e o manejo aplicado. De modo geral, os baixos valores de coeficiente de variação (CV) indicam que a precisão experimental foi adequada, permitindo interpretar os resultados com confiabilidade.

Tabela 1. Resumo da anava.

FV	G L	NF	H	LF	MSPA	MSR	MST	VR	CR	AF	TAL	RAF	RMR	ICF_a	ICF_b	ICF_t
Prop	1	3.67 *	53.64 **	28.25 **	292.20 **	106.86 **	19.16 **	1579.72 **	8.05 *	956.87 **	0.01 *	171.07 **	0.08 **	1207.57 **	3276.01 **	8461.52 **
Bact	4	54.54 **	129.60 **	5.58 **	78.15 **	9.51 **	121.56 **	230.42 **	100.44 **	1542.72 **	0.05 **	43.95 **	0.07 **	364.65 **	22.81 **	455.91 **
C_hidrica	2	38.90 **	17.91 **	10.55 **	254.05 **	15.82 **	116.90 **	981.91 **	499.86 **	2036.69 **	0.01 **	119.64 **	0.05 **	1982.14 **	187.48 **	2277.08 **
Prop x Bact	4	4.42 **	1.86 ns	2.04 **	28.43 **	9.79 **	125.73 **	146.55 **	46.52 **	230.33 **	0.04 **	62.91 **	0.05 **	11.67 ns	17.38 **	32.52 *
Prop x C_hidrica	2	175.87 **	111.27 **	5.71 **	535.16 **	16.26 **	359.06 **	453.28 **	535.83 **	46.40 **	0.44 **	259.80 **	0.18 **	209.53 **	289.37 **	907.15 **
Bact. x C_hidrica	8	23.54 **	28.57 **	2.81 **	50.11 **	3.01 **	51.48 **	87.63 **	87.99 **	271.46 **	0.08 **	52.91 **	0.03 **	114.57 **	165.14 **	442.45 **
Prop x Bact. x C_hidrica	8	24.15 **	46.46 **	0.84 **	38.18 **	0.97 **	8.89 **	68.59 **	35.22 **	52.83 **	0.03 **	32.33 **	0.03 **	106.90 **	156.48 **	102.57 **
Erro	12 0	0.8471	1.2634	0.0804	0.7844	0.1519	0.5448	1.5019	1.2137	3.9217	0.001 5	0.7326	0.002 1	6.2404	4.8225	12.3104
CV (%)		12.04	6.75	11.09	12.15	17.33	10.63	11.78	9.17	6.86	14.76	20.83	18.13	8.31	15.70	7.96
Média geral		7.64	16.64	2.56	7.29	2.25	6.94	10.41	12.01	28.86	0.26	4.11	0.25	30.07	13.98	44.06

** significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

No conjunto das variáveis de crescimento vegetativo número de folhas, altura e área foliar (Figura 1, 2, 3 e 4), as respostas evidenciaram forte dependência da interação tripla entre fatores. Observou-se que o rebento micropropagado, em diversas situações, apresentou desempenho superior ao bulbilho, particularmente em condições de maior disponibilidade hídrica (capacidade de campo). Esse resultado corrobora a literatura que destaca a maior vigorosidade do rebento em comparação a outros tipos de propágulos, especialmente quando associado a microrganismos promotores de crescimento. Ainda assim, algumas bactérias também se destacaram no bulbilho, sugerindo potencial complementar de uso (VOURINNE et al., 2021).

O rebento, enquanto tipo de propágulo vegetativo, mostrou benefícios significativos em comparação a outras formas de propagação, principalmente quando associado as BPCV, isso porque os rebentos já consistem em estruturas parcialmente desenvolvidas, com tecidos diferenciados e, muitas vezes, com reservas energéticas acumuladas. Essa condição favorece o estabelecimento mais rápido da planta no solo, aumentando sua resistência a estresses abióticos (TAIZ et al., 2017).

Além disso, a associação de rebentos com BPCV, como do gênero *Azospirillum* e *Bacillus* potencializa o desenvolvimento inicial da planta. Esses microrganismos estimulou o crescimento radicular, facilitando a absorção de nutrientes, produzindo fitormônios que conferem maior tolerância ao estresse. Assim, a utilização de rebentos como propágulos em estratégias de biofortificação microbiológica representa uma abordagem eficaz e sustentável para melhorar o desempenho morfológico do sisal.

Figura 1. Valores médios de NF para cada combinação de bactéria, tipo de muda e condição hídrica. Medias de bactérias, para cada combinação de tipos de muda e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade. Medias de tipos de mudas, para cada combinação de bactérias e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade.

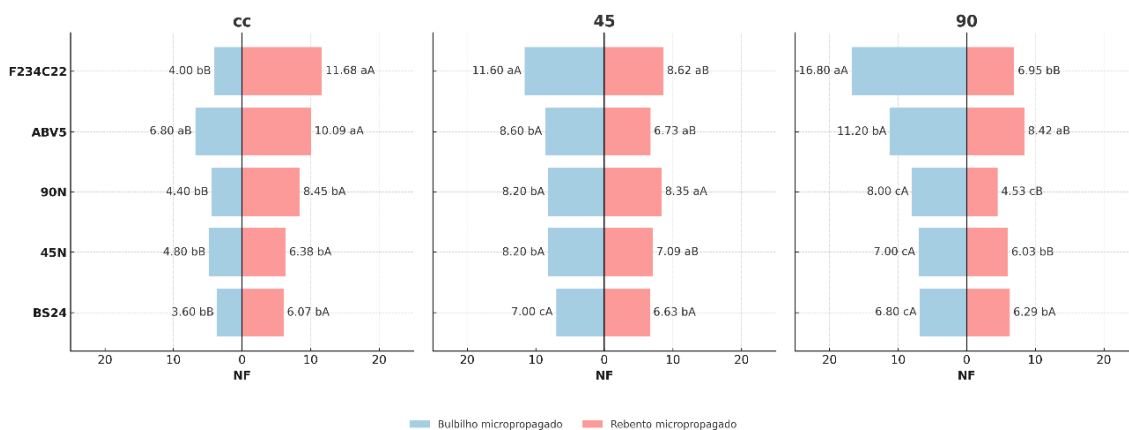


Figura 2. Valores médios de H para cada combinação de bactéria, tipo de muda e condição hídrica. Medias de bactérias, para cada combinação de tipos de muda e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade. Medias de tipos de mudas, para cada combinação de bactérias e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade.

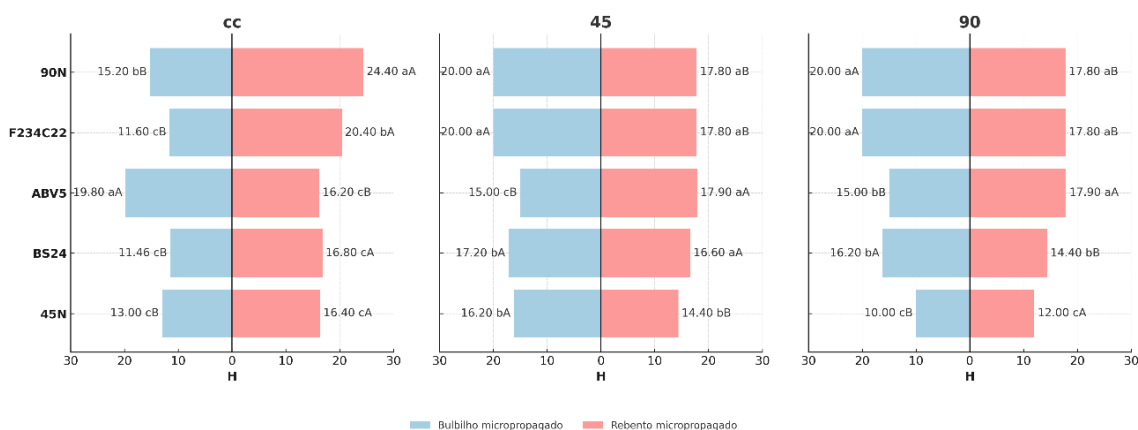
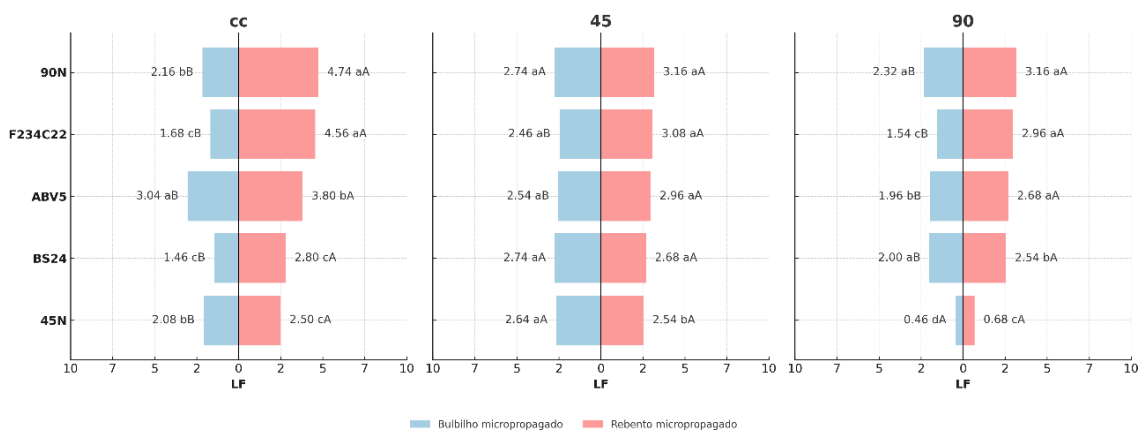


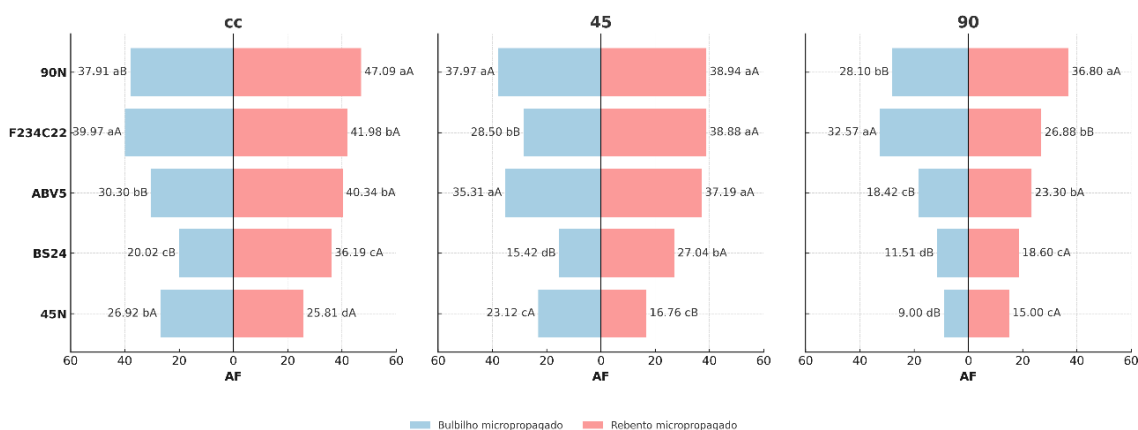
Figura 3. Valores médios de LF para cada combinação de bactéria, tipo de muda e condição hídrica. Medias de bactérias, para cada combinação de tipos de muda e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade. Medias de tipos de mudas, para cada combinação de bactérias e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade.



Dentre as estirpes estudadas é notável a eficiência da estirpe UFRB FA34C2-2 e da estirpe referência Abv 5, ambas por promover maior rendimento de número de folhas, altura da planta, área foliar, a resposta desta bactéria diazotrófica, sendo superior ao tratamento com adubação nitrogenada, pode indicar o suprimento contínuo de nitrogênio pelo *Azospirillum brasilense* (UFRB FA34C2-2) e a estirpe referência *A. brasilense* Abv 5, enquanto o nitrogênio mineral foi rapidamente absorvido e metabolizado pela planta, sem a reposição deste nutriente no solo. Estes resultados também sugerem que essas estirpes de bactérias diazotróficas apresentam capacidade de colonização e sobrevivência no substrato e, possivelmente na rizosfera da planta, uma vez que o benefício se prolongou durante todo o cultivo das plantas, o que poderá ser analisado em estudos futuros.

Azospirillum brasilense e UFRB FA34C2-2 promoveram o aumento na área foliar das plantas com valores semelhantes ao promovido pela inoculação com a estirpe de referência Ab-V5. A capacidade dessas estirpes de aumentar as características de crescimento das plantas de sisal, com valores médios superior aos observados nas plantas que receberam nitrogênio mineral sugere que essas bactérias podem estar atuando no crescimento do sisal através de vários mecanismos como a fixação biológica de nitrogênio, produção de auxina, produção de sideróforos e solubilização de fosfato, do que apenas o suprimento de N, considerando que estas características estão presentes em todas as estirpes (NASCIMENTO et al. 2021).

Figura 4. Valores médios de AF para cada combinação de bactéria, tipo de muda e condição hídrica. Medias de bactérias, para cada combinação de tipos de muda e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade. Medias de tipos de mudas, para cada combinação de bactérias e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade.



Nas variáveis relacionadas à biomassa (MSPA, MSR e MST), os efeitos das bactérias foram ainda mais evidentes (Figura 5, 6 e 7). Tratamentos com UFRB F234C22 e 90N favoreceram maior acúmulo de matéria seca, principalmente em condições ótimas de umidade e quando associadas ao rebento micropropagado. Isso indica não apenas o efeito positivo dessas bactérias na promoção do crescimento, mas também uma possível especificidade de interação com o tipo de muda. A biomassa de raízes também se mostrou bastante sensível ao fator hídrico, destacando a importância da microbiota em mitigar efeitos do déficit. Esses resultados sugerem que a associação de determinados isolados bacterianos pode ser uma estratégia promissora para sustentar a produtividade mesmo em cenários de estresse hídrico.

O aumento da massa da matéria seca da parte aérea e da raiz proporcionado pela inoculação com bactérias diazotróficas é um ganho importante, especialmente em plantas oriundas da micropropagação *in vitro*, pois pode melhorar a fase de aclimação e reduzir o período de permanência das plantas no viveiro e o estabelecimento delas em campo.

A maior influência da estirpe UFRB FA34C2-2 provavelmente ocorreu por mecanismos biológicos não avaliados no presente trabalho como fixação biológica de nitrogênio, solubilização de fosfato, síntese de ácido índole acético e produção de exopolissacarídeos, conforme descrito por Sousa, (2017) e Braulio et al., (2021). Braulio et al. (2020) relataram que a inoculação com a estirpe UFRB FA34C2-2 promoveu o aumento no número de folhas, índice de clorofila, biomassa seca da parte aérea e raiz e o acúmulo de nitrogênio e fósforo na parte aérea das plantas de almeirão, cultivadas em Latossolo Amarelo distrófico, sendo estes valores superior ao das plantas fertilizadas com nitrogênio mineral.

Santos et al. (2019) descreveram a ocorrência de bactérias fixadoras de nitrogênio, associadas ao sisal, dentre as quais *Bacillus*, *Paenibacillus* e *Rhizobium* estavam presentes e os autores concluíram que essas bactérias têm potencial para a formulação de bioestimulantes para o sisal e outras culturas produzidas em regiões semiáridas. Sugere-se, portanto, que a inoculação de estirpes eficientes de bactérias fixadoras de nitrogênio pode estimular o melhor crescimento das plantas nas regiões semiáridas, sendo indicada como uma biotecnologia de baixo custo para serem utilizadas em sistemas agrícolas nessas regiões.

Figura 5. Valores médios de MSPA para cada combinação de bactéria, tipo de muda e condição hídrica. Medias de bactérias, para cada combinação de tipos de muda e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade. Medias de tipos de mudas, para cada combinação de bactérias e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade.

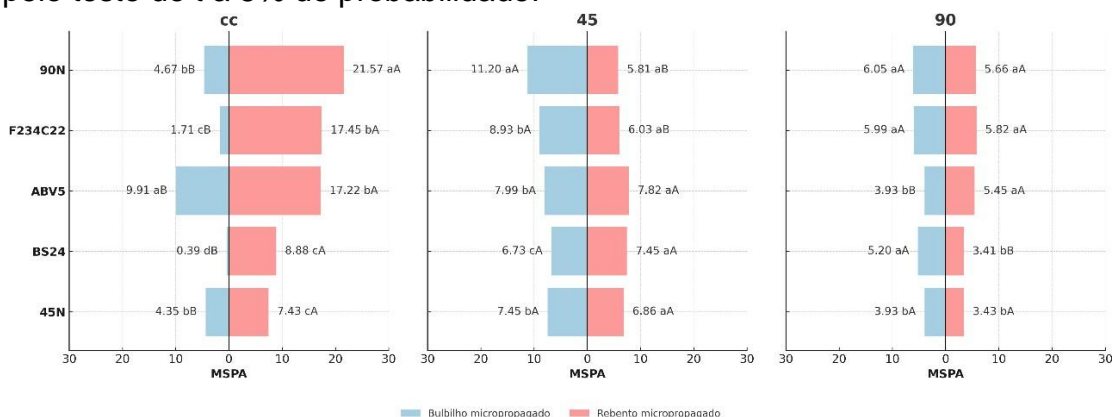


Figura 6. Valores médios de MSR para cada combinação de bactéria, tipo de muda e condição hídrica. Medias de bactérias, para cada combinação de tipos de muda e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade. Medias de tipos de mudas, para cada combinação de bactérias e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade.

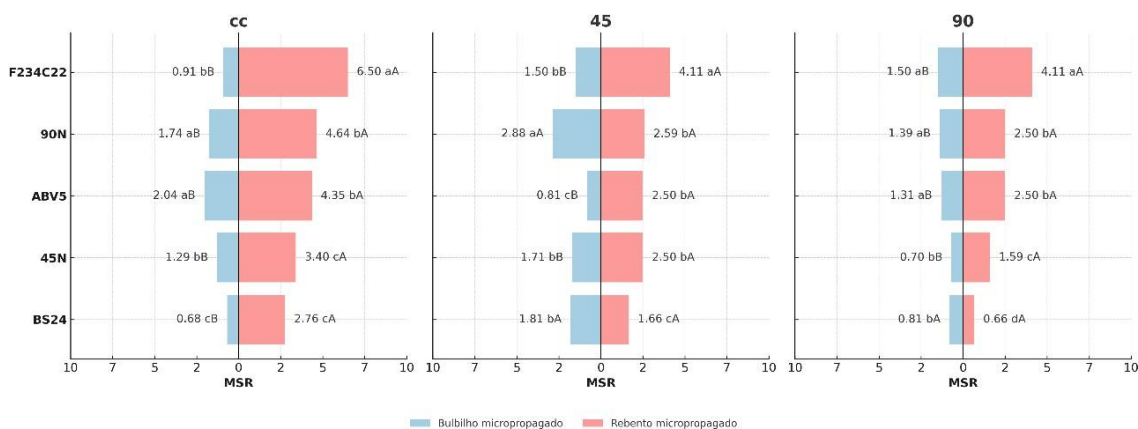
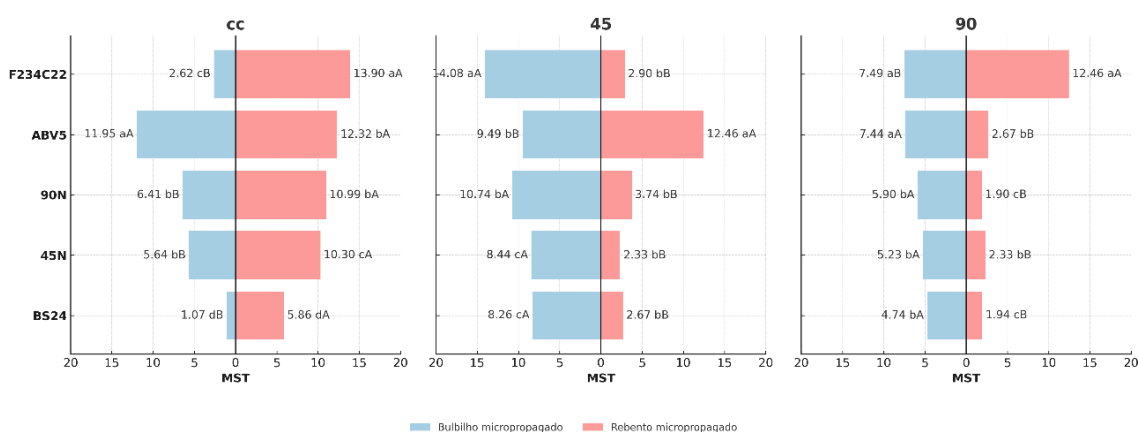


Figura 7. Valores médios de MST para cada combinação de bactéria, tipo de muda e condição hídrica. Medias de bactérias, para cada combinação de tipos de muda e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade. Medias de tipos de mudas, para cada combinação de bactérias e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade.



As variáveis fisiológicas (RAF, RMR, TAL e os índices de fluorescência – ICFa, ICFb e ICFT) reforçam a interpretação anterior (Figuras 8, 9, 10, 11, 12 e 13). Em geral, o déficit hídrico reduziu significativamente os valores médios, mas algumas bactérias foram capazes de manter níveis mais elevados, evidenciando

efeitos benéficos no equilíbrio fisiológico das plantas. Notadamente, observou-se que sob estresse severo (45% e 90% da capacidade de campo), determinados tratamentos bacterianos atenuaram as reduções de taxa assimilatória e parâmetros relacionados à eficiência fotoquímica.

Embora *Agave sisalana* seja uma espécie adaptada a ambientes semiáridos e com metabolismo CAM (Crassulacean Acid Metabolism), o estresse hídrico prolongado pode afetar negativamente o desenvolvimento de mudas jovens, principalmente quando em fase inicial de estabelecimento. A redução observada nas variáveis pode ser atribuída ao impacto direto da limitação de água sobre os processos fisiológicos e metabólicos essenciais ao desenvolvimento das plantas (SANTOS et al., 2019).

O estresse hídrico compromete a absorção de água e nutrientes pelas raízes, reduzindo a turgidez celular e afetando a expansão e divisão celular, além disso, a restrição hídrica leva ao fechamento dos estômatos como mecanismo de defesa, diminuindo a taxa de transpiração e, conseqüentemente, a assimilação de CO₂, o que limita a fotossíntese e a produção de fotoassimilados necessários para o acúmulo de biomassa (TAIZ et al., 2017).

Figura 8. Valores médios de TAL para cada combinação de bactéria, tipo de muda e condição hídrica. Medias de bactérias, para cada combinação de tipos de muda e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade. Medias de tipos de mudas, para cada combinação de bactérias e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade.

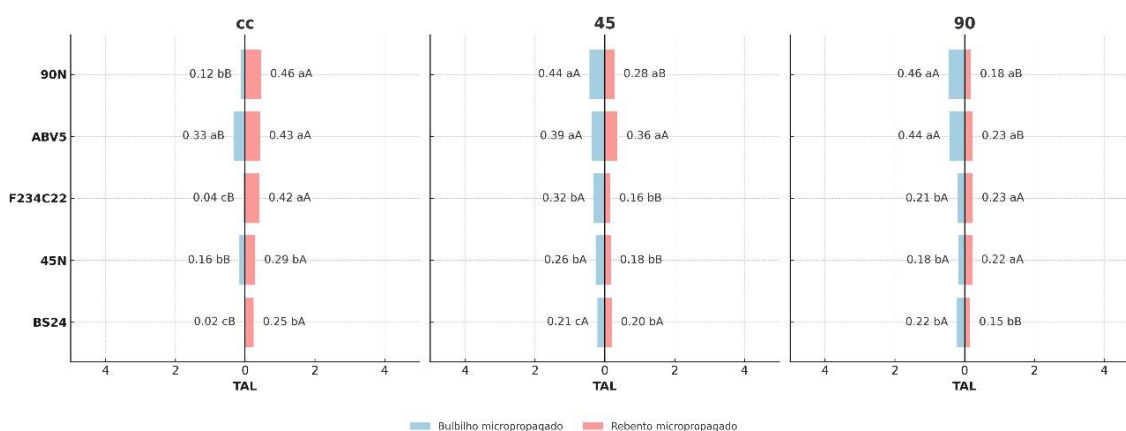


Figura 9. Valores médios de RAF para cada combinação de bactéria, tipo de muda e condição hídrica. Medias de bactérias, para cada combinação de tipos de

muda e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade. Medias de tipos de mudas, para cada combinação de bactérias e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade.

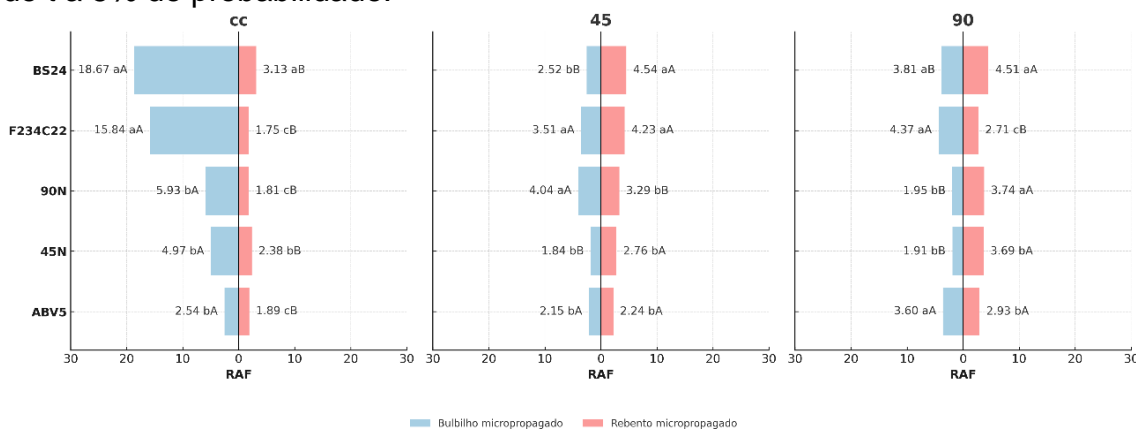
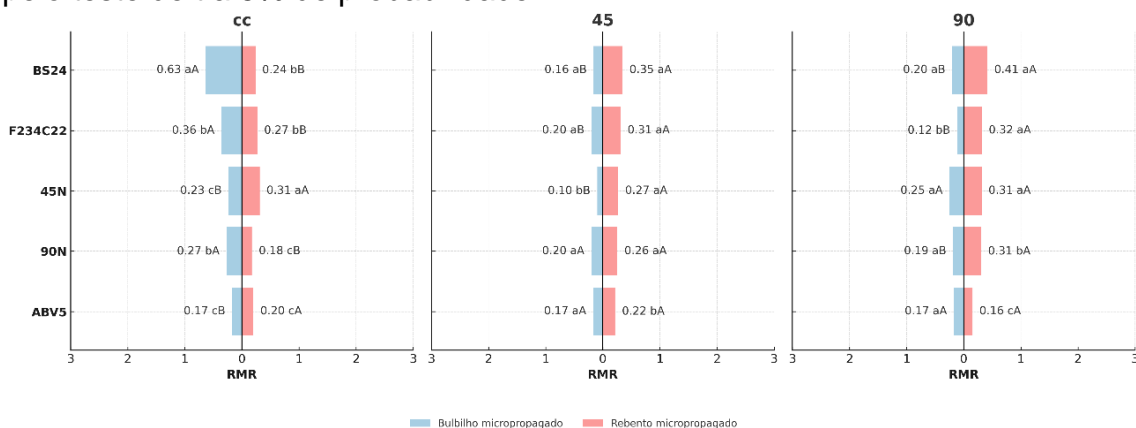


Figura 10. Valores médios de RMR para cada combinação de bactéria, tipo de muda e condição hídrica. Medias de bactérias, para cada combinação de tipos de muda e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade. Medias de tipos de mudas, para cada combinação de bactérias e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade.



Estudos demonstram que o índice de clorofila pode ser usado como variável para avaliação do estado nutricional de N das plantas, apresentando maior rendimento das culturas (SILVA et al., 2014; LIU et al., 2019; BRAULIO et al., 2020; BRAULIO et al., 2021).

O nitrogênio é um nutriente absorvido em grande quantidade pela maioria das culturas, sendo utilizado na síntese de compostos celulares, como a clorofila, que está relacionada com o processo fotossintético, por isso que o índice de clorofila, estimado por meio de ferramentas indiretas como o clorofilômetro portátil, tem se mostrado uma variável eficiente para a avaliação do estado nutricional de nitrogênio (N) em diversas culturas. Isso se deve à relação direta entre os teores de N foliar e o conteúdo de clorofila, uma vez que o nitrogênio é um dos principais constituintes da molécula de clorofila e está diretamente envolvido nos processos de fotossíntese e metabolismo primário. Em condições de restrição hídrica, essa variável torna-se ainda mais relevante, pois o estresse hídrico pode afetar tanto a absorção quanto a assimilação de N pelas plantas, refletindo em alterações nos níveis de clorofila (MATOSO et al., 2020).

Assim, o uso do índice de clorofila como indicador do status nutricional de N permite uma avaliação não destrutiva, rápida e sensível do efeito combinado da disponibilidade de nitrogênio e da limitação hídrica sobre o desempenho fisiológico do *Agave sisalana*, contribuindo para a interpretação dos resultados de crescimento e eficiência no uso de nutrientes.

Figura 11. Valores médios de ICF_a para cada combinação de bactéria, tipo de muda e condição hídrica. Medias de bactérias, para cada combinação de tipos de muda e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade. Medias de tipos de mudas, para cada combinação de bactérias e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade.

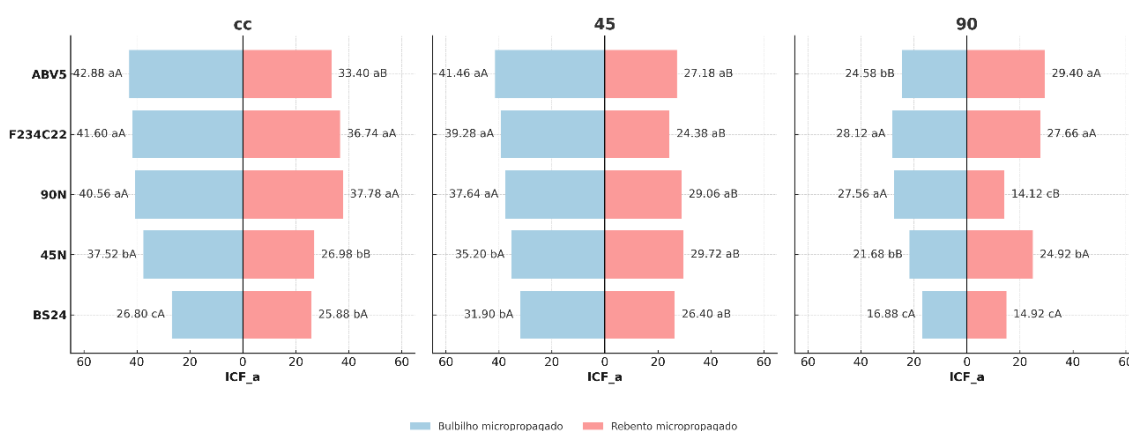


Figura 12. Valores médios de ICF_b para cada combinação de bactéria, tipo de muda e condição hídrica. Medias de bactérias, para cada combinação de tipos de muda e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade. Medias de tipos de mudas, para cada combinação de bactérias e condição hídrica, seguidas pelas

mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade.

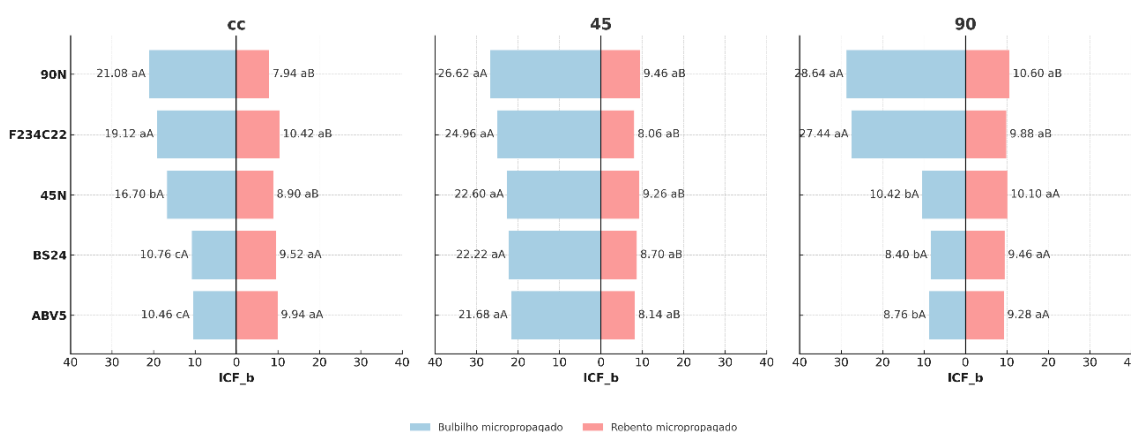
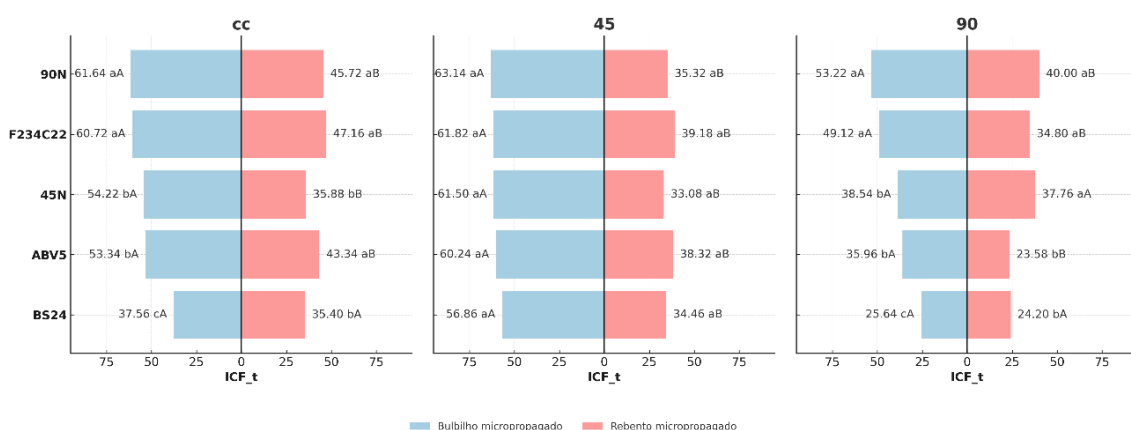


Figura 13. Valores médios de ICF_T para cada combinação de bactéria, tipo de muda e condição hídrica. Medias de bactérias, para cada combinação de tipos de muda e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade. Medias de tipos de mudas, para cada combinação de bactérias e condição hídrica, seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de t a 5% de probabilidade.



Esses resultados sugerem que a inoculação com microrganismos específicos pode conferir maior tolerância ao estresse, atuando tanto no crescimento quanto nos processos fisiológicos fundamentais. A análise integrada evidencia que não há um tratamento universalmente superior, mas sim

combinações mais promissoras em função do ambiente e do tipo de propágulo utilizado. A interação tripla significativa para a maioria das variáveis demonstra que a escolha isolada de um fator (apenas tipo de muda, apenas bactéria ou apenas manejo hídrico) não é suficiente para garantir o melhor desempenho. O efeito conjunto deve ser considerado, uma vez que a resposta das plantas à inoculação bacteriana é fortemente modulada pelo ambiente e pelo material propagativo. Em termos práticos, os resultados ressaltam a importância de selecionar bactérias eficientes e adaptadas ao contexto hídrico, bem como considerar o tipo de muda utilizado no campo.

O uso de rebentos micropropagados, associados a isolados como F234C22 e 90N, mostrou desempenho consistente em diversas variáveis, configurando-se como uma alternativa viável para aumentar a resiliência das culturas frente à variabilidade climática. O desempenho positivo de bulbilhos inoculados em condições específicas sugere que diferentes estratégias podem ser adotadas, de acordo com a disponibilidade de mudas e as condições do cultivo. Portanto, este estudo demonstra que a integração entre propagação *in vitro* e bioinoculação bacteriana constitui uma abordagem eficiente para otimizar o crescimento e a tolerância de mudas frente ao déficit hídrico. Tais resultados reforçam a necessidade de avançar em estudos de seleção de combinações bactéria–propágulo–ambiente, visando ampliar a adoção prática dessas tecnologias em programas de produção sustentável.

4. CONCLUSÕES

Mudas de rebento micropropagados, associados ao isolado UFRB F234C22 e à dose de 180 Kg ha⁻¹ de nitrogênio na capacidade de campo, promoveu maior crescimento e acúmulo de biomassa.

Mudas de sisal micropropagadas *in vitro* e inoculadas com bactérias promotoras de crescimento é uma estratégia promissora para o fortalecimento do sistema produtivo do sisal, especialmente em regiões semiáridas, contribuindo para maior resiliência da cultura frente às adversidades climáticas e redução da dependência de insumos convencionais

5. REFERÊNCIAS

ADMASSIE, M.; WOLDEHAWARIAT, Y.; ALEMU, T.; GONZALEZ, E.; JIMENEZ, J. F. The role of plant growth-promoting bacteria in alleviating drought stress on pepper plants. **Agricultural Water Management**, 272, 107831, 2022.

ARMADA, E.; PROBANZA, A.; ROLDÁN, A.; AZCÓN, R. Native plant growth promoting bacteria *Bacillus thuringiensis* and mixed or individual mycorrhizal species improved drought tolerance and oxidative metabolism in *Lavandula dentata* plants. **Journal of plant physiology**, 192, 1-12, 2016.

BENINCASA, M. M. P. Análise de crescimento de plantas: noções básicas. **Jaboticabal**: FUNEP, 2003. 42 p.

BRAULIO, C.S.; NÓBREGA, R.S.A.; SILVA, L.C.V.; CORREIA, A.J. SOUSA, C.B.C.; PEREIRA, E.G. Inoculation of diazotrophic bacteria in chicory. **Revista Horticultura Brasileira**, v.38, n. 2, p.185-191, 2020

BRAULIO, C. S.; SILVA, L. F.L.; SILVA, C. S.; CORREIA, A. J.; ROCABADO, J. M. A.; NOBREGA, R.S.A Can inoculation with diazotrophic bacteria decrease the productivity loss of defoliated *Vigna unguiculata* (L.) Walp? **Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering**, v. 25, p. 189-196, 2021.

CAVALCANTI, M.I.P.; NASCIMENTO, R.C.; RODRIGUES, D.R.; ESCOBAR, I.E.C.; FRAIZ, A.C.R.; SOUZA, A.P.; FREITAS, A.D.S.; NÓBREGA, R.S.A.; FERNANDES-JÚNIOR, P.I. Maize growth and yield promoting endophytes isolated into a legume root nodule by a cross-over approach. **Rhizosphere** 15:100-211, 2020.

COELHO B.A, DIAS V.C.; PELÚZIO, J.M.; SOUZA C.M.; SIQUEIRA G.B.; SANTOS, W.F. Produtividade do milho cultivado em baixa latitude na entressafra inoculado com *Azospirillum brasilense* com diferentes doses de nitrogênio. **Journal of Bioenergy and Food Science**. 6: 18-28, 2019.

DE PAULA, M.P.; LACERDA, T.M.; ZAMBON, M.D.; FROLLINI, E. Agregando valor ao sisal brasileiro: hidrólise ácida de sua polpa visando a produção de açúcares e matérias-primas. **Celulose** 19, 975–992. doi:10.1007/s10570-012-9674-8, 2012.

FANG, X.M.; LI, Y.S.; NIE, J; WANG, C.; HUANG, K.H.; ZHANG, Y.K.; ZHANG, Y.L.; SHE, H.Z.; LIU, X.B; RUAN, R.W; YUAN, X.; YI, Z. Efeitos do fertilizante de nitrogênio e da densidade de plantio nas características fotossintéticas das folhas, características agrônômicas e rendimento de grãos em trigo sarraceno comum (*Fagopyrum esculentum* M.) **Pesquisa de culturas de campo**. 2018; 219:160–168. doi: 10.1016/j.fcr.2018.02.001.

FONSECA, A.J.; TASSONE, G.A.T.; CARNEIRO, M.A.C.; CARVALHO, G.R.; CARVALHO, C.H.S.; BOTELHO, C.E. Roles of arbuscular mycorrhizal fungi on acclimatization of clones of *Coffea arabica* L. produced by somatic embryogenesis. **Ciência e Agrotecnologia**, 44:11-20, 2020.

FUKAMI, J.; CEREZINI, P.; HUNGRIA, M. *Azospirillum*: benefits that go far beyond biological nitrogen fixation. **AMB Express**. 8: 73-90, 2018.

GUIMARÃES, V. F.; BATTISTUS, A. G.; SOUZA, A. K. P. de; BULEGON, L. G.; OFFEMANN, L. C.; INAGAKI, A. M. Bactérias Promotoras de Crescimento Vegetal: da FBN à regulação hormonal, possibilitando novas aplicações. **Ciências agrárias: Ética do cuidado, legislação e tecnologia na agropecuária**, p. 192–212, 2017.

IPCC. IPCC, 2023: Climate Change 2023, Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. **Geneva, Switzerland**, 2023. p. 35-115. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

KOZA, N. A.; ADEDAYO, A. A.; BABALOLA, O. O.; KAPPO, A. P. Microorganisms in plant growth and development: Roles in abiotic stress tolerance and secondary

metabolites secretion. **Microorganisms**, 10(8), 1528, 2022.

LEE, KO-EUN; ADHIKARI, A.; KANG, SANG-MO; YOU, YOUNG-HYUN; JOO, GILJAE; KIM, JIN-HO; KIM, SANG-JUN; LEE, IN-JUNG. Isolation and Characterization of the High Silicate and Phosphate Solubilizing Novel Strain *Enterobacter ludwigii* GAK2 that Promotes Growth in Rice Plants. **Agronomy**, v.9, p.144, 2019.

LIU, X.; LI, Q.; LI, Y.; GUAN, G.; CHEN, S. *Paenibacillus* strains with nitrogen fixation and multiple beneficial properties for promoting plant growth. **PeerJ**. 7:74-85, 2019.

MONJA-MIO, K.M.; HERRERA-ALAMILLO, M.A.; SÁNCHEZ-TEYER, L.F.; E ROBERT, M.L. Estratégias de melhoramento para melhorar a produção de agave (agave spp.), em Avanços em estratégias de melhoramento de plantas: culturas industriais e alimentares Cham: **Springer International Publishing**, 319–362, 2019. doi:10.1007/978-3-030-23265-810.

MOREIRA, F.M.; CAIRO, P.A.R.; NASCIMENTO, L.R.; ROSA, R.C.C.C.; ROCHA, L.S.; HADDAD, F. Optimal growth and N use efficiency enhancements by growth promoting rhizobacteria in seedlings banana under N2 deficiency. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v.50, n.102734, 2023.

PÉREZ-ZAVALA, M. D.E L.; HERNÁNDEZ-ARZABA, J.C.; BIDESHI, D.K. E BARBOZA-CORONA, J.E. Agave: um recurso natural renovável com múltiplas aplicações. **Journal Science Food Agriculture**, 5324–5333, 2020. doi:10.1002/jsfa.10586.

R Core Team (2025). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
<<https://www.R-project.org/>>.

RAYA, F.T.; DE ABREU, L.G.F.; MARONE, M.P.; SALVADOR, M. D.E A.; BRESSIANI, J.Á.; LABORDE, J.I.D.R. Novas matérias-primas para a produção de

bioetanol: cana-energia e agave, em Biocombustíveis líquidos: bioetanol. Editores: CR Soccol, GAG Pereira, C. Dussap e LPS Vandenberghe Cham: **Springer**, 431–455, 2022. doi:10.1007/978-3-031-01241-918.

SANTOS, A. F. J.; MOREIRA, Z. P. M.; SOUZA, J. T.; OLIVEIRA, L. M.; BARBOSA, H.R.; SILVA, E. S.; SILVA, R. M.; SOARES, A. C. F. Culturable diazotrophic bacterial community associated with *Agave sisalana* P. plants from semi-arid regions in Brazil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. v. 14: p. 56-66, 2019.

SANTOS, J.D.G.; VIEIRA, I.J.C.; BRAZ-FILHO, R. E BRANCO, A. Substâncias químicas da biomassa de *Agave sisalana*: isolamento e identificação. **Int. J. Mol. Sci.** 16, 8761–8771, 2015. doi:10.3390/ijms16048761.

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