



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS I - CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM BACHARELADO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS**

MARIA CLARA RUFINO DOS SANTOS

**COINOCULAÇÃO COM CEPAS DE BACILOS PARA MELHORAR O
CRESCIMENTO E A ABSORÇÃO DE NUTRIENTES NO GERGELIM SOB
DÉFICIT HÍDRICO**

**CAMPINA GRANDE
2024**

MARIA CLARA RUFINO DOS SANTOS

**COINOCULAÇÃO COM CEPAS DE BACILOS PARA MELHORAR O
CRESCIMENTO E A ABSORÇÃO DE NUTRIENTES NO GERGELIM SOB
DÉFICIT HÍDRICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Coordenação do Curso de Ciências Biológicas
da Universidade Estadual da Paraíba, como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Ciências Biológicas.

Área de concentração: Manejo e
Conservação do Solo / Microbiologia
Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Alberto Soares de Melo.

Coorientadora: Profa. Dra. Liziane Maria de Lima.

**CAMPINA GRANDE
2024**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

S237c Santos, Maria Clara Rufino dos.
Coinoculação com cepas de bacilos para melhorar o crescimento e a absorção de nutrientes no gergelim sob déficit hídrico [manuscrito] / Maria Clara Rufino dos Santos. - 2024.
44 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, 2024.

"Orientação : Prof. Dr. Alberto Soares de Melo ,
Coordenação de Curso de Biologia - CCBS. "

"Coorientação: Profa. Dra. Liziane Maria de Lima ,
Embrapa Algodão "

1. Sesamum indicum L. 2. Rizobactérias. 3. Seca. I. Título
21. ed. CDD 570

MARIA CLARA RUFINO DOS SANTOS

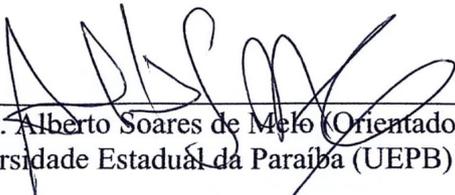
COINOCULAÇÃO COM CEPAS DE BACILOS PARA MELHORAR O CRESCIMENTO
E A ABSORÇÃO DE NUTRIENTES NO GERGELIM SOB DÉFICIT HÍDRICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Coordenação do Curso de Ciências Biológicas
da Universidade Estadual da Paraíba, como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Ciências Biológicas.

Área de concentração: Manejo e Conservação
do Solo/ Microbiologia Agrícola.

Aprovada em: 06/06/2024.

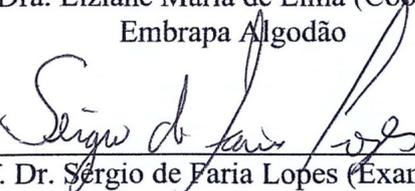
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Alberto Soares de Melo (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Profa. Dra. Liziane Maria de Lima (Coorientadora)
Embrapa Algodão



Prof. Dr. Sérgio de Faria Lopes (Examinador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Dra. Geisenilma Maria Gonçalves da Rocha (Examinadora)

Ao meu avô Manoel Rufino Sobrinho (*in memoriam*), sua influência em minha vida é eterna. Seu legado vive em mim.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Rilma Janaina Carneiro Rufino, uma mulher de força inigualável, que fez de tudo para me proporcionar as melhores oportunidades. Sua dedicação e amor moldaram quem eu sou hoje. Este é um pequeno tributo à sua incansável determinação e ao seu amor incondicional.

Aos meus avós, Manoel Rufino Sobrinho (*in memoriam*) e Vilma Carneiro Rufino, por todos os aprendizados. Seu amor, sabedoria e apoio foram fundamentais. Vocês me ensinaram a persistir, acreditar em mim mesma e sempre buscar conhecimento.

Às minhas tias, Dayseana Carneiro Rufino, Jaqueline Carneiro Rufino de Assis e Dayse Dayana Carneiro Rufino pela confiança, incentivo e companheirismo durante todo o processo. Vocês também me ensinaram a sempre buscar conhecimento.

Aos meus avós de coração, Antônio Duarte (*in memoriam*) e Odacir Carneiro, por todo amor, sabedoria, apoio e cuidado. Vocês foram fundamentais em minha jornada, serei eternamente grata por tudo.

Ao meu pai de coração, Alex de Assis Silva, cuja ajuda incansável, carinho imensurável e apoio constante foram pilares fundamentais em minha jornada acadêmica. Sem você, esta conquista não teria sido possível.

Aos meus primos, Arthur Carneiro Rufino de Assis e Daniela Maria Rufino Fernandes por serem os amorzinhos da família. Em particular, quero expressar minha gratidão a Jonatas da Silva Duarte, pelo apoio inestimável nos momentos mais difíceis.

Aos meus amigos (as): Andreza Santos, Priscila Barbosa, Brenda Ismirna, Matheus Gutemberg, Camila Lima, Marcelo Ipuchima, Érika Fernandes, João Pedro, Gustavo Oliveira, Tailson Verenilson, Ana Gabriela Diniz e Núbia Pereira por compartilharem de todos os momentos e pelas palavras de carinho e incentivo, meu mais sincero agradecimento. Sem o apoio de vocês, este trabalho não teria sido possível.

À Ana Gabriela Alves, minha dupla de laboratório, por todo o suporte durante os anos de pesquisa na Embrapa. Sua dedicação e ajuda foram essenciais para mim.

À João Henrique, que foi um suporte fundamental durante todo o processo de escrita deste trabalho. Sua presença trouxe conforto nos momentos mais desafiadores, e suas palavras foram um verdadeiro incentivo para seguir em frente.

À Rafael e Andreza, por todo o apoio ao longo desta caminhada, sou profundamente grata. Compartilhamos a casa e enfrentamos dificuldades juntos; a presença de vocês ao meu lado foi fundamental para que eu pudesse seguir em frente. Agradeço de coração por tudo.

As minhas amigas, em especial Naiellen Vicente e Sarah David, cuja paciência, apoio e amizade foram fundamentais ao longo desta jornada. Naiellen, sua companhia e encorajamento constantes me ajudaram a superar muitos desafios. Sarah, seus conselhos sempre me inspiraram a continuar. A amizade de vocês foi um pilar de força e alegria durante todo este processo.

À minha tia Dayseana, em especial, sua dedicação e esforço incansáveis foram inestimáveis. Sua constante disposição para providenciar tudo o que eu precisava fez toda a diferença. Serei eternamente grata por todo o apoio e carinho.

Ao meu orientador, Dr. Alberto Soares, pela orientação e apoio durante todo o desenvolvimento deste trabalho, minha profunda gratidão. Agradeço pela paciência e disponibilidade em todos os momentos.

À minha coorientadora, Dr^a. Liziane Maria, pelo carinho, dedicação e paciência. Sua disponibilidade para revisar, sugerir melhorias e enriquecer este trabalho foi essencial. Seu compromisso com meu crescimento acadêmico e pessoal fez toda a diferença, sou imensamente grata por todo o tempo e esforço que você dedicou a mim.

Ao Dr. Sérgio de Faria, pela generosidade em aceitar fazer parte da banca examinadora. Sua presença e contribuição são uma honra para mim. Agradeço por seu tempo, conhecimento e disposição em participar desta etapa tão importante.

À Dra. Geisenilma Maria, cuja ajuda nas análises de laboratório e na estatística foi inestimável. Sua disposição em ajudar e seu incansável apoio foram vitais para o sucesso deste projeto. Agradeço profundamente por sua generosidade e dedicação.

Às técnicas do Laboratório de Biotecnologia da Embrapa Algodão, Fábiana Suely e Terezinha Duarte, pela paciência, suporte e profissionalismo durante as análises.

Ao Dr. Tarcísio Gondim e aos técnicos e colaboradores da Embrapa Algodão por todo o auxílio.

À Universidade Estadual da Paraíba, pela oportunidade de qualificação no curso.

À Embrapa Algodão, pela infraestrutura para a realização de toda a pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa.

Agradeço imensamente a todos que, de alguma maneira, colaboraram para concretizar este trabalho.

OBRIGADA!

“Talvez você nunca se sinta totalmente preparado para nada, mas não permita que o medo te impeça de avançar. Um passo de cada vez. Um dia de cada vez. O Universo tem uma queda pelos corajosos.”

(Wandy Luz).

RESUMO

A aplicação de rizobactérias que promovem o crescimento vegetativo tem se destacado como uma estratégia eficaz para mitigar os impactos dos estresses abióticos na agricultura. Esses microrganismos aumentam a disponibilidade de nutrientes no solo e exercem influência positiva no transporte de água, antioxidantes, genes e proteínas relacionadas ao estresse nas plantas. Além disso, a estratégia de coinoculação, combinando diferentes estirpes bacterianas, parece potencializar ainda mais esses benefícios. Assim, esses inoculantes surgem como uma alternativa para melhorar o desempenho das culturas, tornando-as mais resistentes a condições ambientais adversas, como a seca. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o potencial de diferentes estirpes de bacilos, tanto individualmente quanto em coinoculação, para promover o crescimento vegetativo e atenuar os efeitos do déficit hídrico em gergelim (*Sesamum indicum* L.), com o intuito de identificar o tratamento mais eficaz. O experimento foi conduzido em casa de vegetação na Embrapa Algodão (Campina Grande-PB), onde os tratamentos foram caracterizados em: (1) manejo com nitrogênio químico (sulfato de amônio, SAM; 21% de N) e (2) manejo com inoculantes, sendo três inoculações individuais - pant001, ESA 402 e M143, e três inoculações consorciadas - pant001 x ESA 402, pant001 x M143 e ESA 402 x M143, sob dois regimes hídricos (com e sem irrigação). O delineamento experimental foi inteiramente casualizado em esquema fatorial oito manejos (sendo três inoculações individuais, três inoculações consorciadas, um manejo com nitrogênio químico - sulfato de amônia e um tratamento sem nitrogênio - testemunha absoluta) x dois regimes hídricos (com e sem restrição hídrica), com quatro repetições. Foram realizadas as avaliações: agronômicas (altura de planta, comprimento de raízes, massa seca da parte aérea e massa seca de raízes); e químicas (teor de nitrogênio e fósforo acumulados na parte aérea). Os dados foram analisados utilizando o programa estatístico SISVAR versão 5.6, submetidos à análise de variância ($p \leq 0,05$), e as médias comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). A interação entre regime hídrico x tratamento revelou que as variáveis altura de planta, massa seca das raízes, comprimento das raízes e teor de nitrogênio acumulado na parte aérea foram estatisticamente significativas, destacando-se as interações que mais contribuíram para mitigar os efeitos do déficit hídrico: pant001, M143 e as coinoculações pant001 x ESA402 e pant001 x M143. Esses achados indicam o potencial promissor do uso de inoculantes à base de pant001 e M143 como uma estratégia eficaz para otimizar o crescimento vegetativo e aumentar a resistência das plantas de gergelim ao déficit hídrico.

Palavras-Chave: *Sesamum indicum* L.; rizobactérias; seca.

ABSTRACT

The application of plant growth-promoting rhizobacteria has emerged as an effective strategy to mitigate the impacts of abiotic stresses in agriculture. These microorganisms increase nutrient availability in the soil and positively influence the transport of water, antioxidants, stress-related genes, and proteins in plants. Furthermore, the strategy of co-inoculation, combining different bacterial strains, appears to further enhance these benefits. Thus, these inoculants offer an alternative to improve crop performance, making them more resistant to adverse environmental conditions, such as drought. In this context, the aim of this study was to evaluate the potential of different *Bacillus* strains, both individually and in co-inoculation, to promote vegetative growth and attenuate the effects of water deficit in sesame (*Sesamum indicum* L.), with the intention of identifying the most effective treatment. The experiment was conducted in a greenhouse at Embrapa Algodão (Campina Grande-PB), where the treatments were characterized as: (1) management with chemical nitrogen (ammonium sulfate, SAM; 21% N) and (2) management with inoculants, consisting of three individual inoculations - pant001, ESA 402, and M143, and three co-inoculations - pant001 x ESA 402, pant001 x M143, and ESA 402 x M143, under two water regimes (with and without irrigation). The experimental design was completely randomized in a factorial scheme of eight managements (three individual inoculations, three co-inoculations, one management with chemical nitrogen - ammonium sulfate, and one treatment without nitrogen - absolute control) x two water regimes (with and without water restriction), with four repetitions. Evaluations were conducted: agronomic (plant height, root length, shoot dry mass, and root dry mass); and chemical (nitrogen and phosphorus content accumulated in the shoot). Data were analyzed using the SISVAR statistical program version 5.6, subjected to analysis of variance ($p \leq 0.05$), and means compared by Tukey's test ($p \leq 0.05$). The interaction between water regime x treatment revealed that the variables plant height, root dry mass, root length, and nitrogen content accumulated in the shoot were statistically significant, highlighting the interactions that most contributed to mitigating the effects of water deficit: pant001, M143, and the co-inoculations pant001 x ESA 402 and pant001 x M143. These findings indicate the promising potential of using pant001 and M143-based inoculants as an effective strategy to optimize vegetative growth and increase the drought resistance of sesame plants.

Keywords: *Sesamum indicum* L.; rhizobacteria; drought.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Implantação do experimento, emergência de plântulas e plantas 23 dias após a emergência em casa de vegetação. (A) Implantação do experimento, (B) emergência das plântulas e (C) Plantas 23 dias após a emergência..... 24
- Figura 2 – Plantas do genótipo BRS Seda de gergelim irrigadas (à esquerda) e sob restrição hídrica (à direita). (A) sem nitrogênio, (B) com nitrogênio, (C) pant001, (D) ESA 402, (E) M143, (F) pant001 x ESA 402, (G) pant001 x M143, (H) ESA 402 x M143..... 28
- Figura 3 - Análise das variáveis agronômicas do genótipo de gergelim BRS Seda inoculado com bacilos, sob restrição hídrica. (A) Altura de plantas (ALT), (B) massa seca da parte aérea (MSPA), (C) massa seca de raiz (MSR) e (c) comprimento da raiz (CR). Letras minúsculas comparam os tratamentos; letras maiúsculas comparam os regimes hídricos dentro de cada tratamento..... 30
- Figura 4 - Análise das variáveis químicas do genótipo BRS Seda de gergelim inoculado com bacilos, sob restrição hídrica. (A) Fósforo (P) e (B) nitrogênio acumulado na parte aérea (NPA). Letras minúsculas comparam os tratamentos; letras maiúsculas comparam os regimes hídricos dentro de cada tratamento..... 33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Resumo das análises de variância (ANOVA) e contrastes para as variáveis altura de plantas (ALT - cm), massa seca da parte aérea (MSPA - g), massa seca de raiz (MSR - g), comprimento da raiz (CR - cm), fósforo (P) e nitrogênio acumulado na parte aérea (NPA), no genótipo BRS Seda de gergelim inoculado com bacilos, sob restrição hídrica.....	29
------------	--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABA	Ácido abscísico
ALT	Altura
APX	Ascorbato peroxidase
CAT	Catalase
CR	Comprimento da raiz
CV	Coefficiente de variação
DAE	Dias após a emergência
EROS	Espécies reativas de oxigênio
GPCRs	Receptores acoplados à proteína G
MSPA	Massa seca da parte aérea
MSR	Massa seca da raiz
NPA	Nitrogênio acumulado na parte aérea
PGPR	Plant growth promoting rhizobacteria
PRO	Prolina
SOD	Superóxido dismutase

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1	Bacilos como rizobactérias promotoras do crescimento de plantas.....	15
2.2	Aspectos morfológicos da cultura do gergelim.....	17
2.3	O gergelim e sua importância econômica.....	18
2.4	Condições de cultivo do gergelim.....	19
2.5	Comportamento fisiológico de plantas sob déficit hídrico.....	20
3	METODOLOGIA	23
3.1	Implantação e condução do experimento em casa de vegetação.....	23
3.2	Cultivo das bactérias e preparo dos inoculantes.....	24
3.3	Variáveis agronômicas do experimento.....	24
3.4	Análise de nitrogênio.....	25
3.5	Análise de fósforo.....	25
3.6	Análises estatísticas.....	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
5	CONCLUSÃO	35
	REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

O gergelim (*Sesamum indicum* L.), pertencente à família Pedaliaceae, é uma das plantas oleaginosas mais antigas e utilizadas pela humanidade, com seu uso agrícola datando mais de 5.000 anos. Originário da África, cultivado majoritariamente em regiões tropicais e subtropicais, o gergelim possui grande adaptabilidade às condições edafoclimáticas de clima quente. No entanto, apesar de sua adaptabilidade, a produção de gergelim é significativamente afetada pela escassez de água, sendo as precipitações pluviométricas bem distribuídas essenciais para alcançar seu potencial máximo de rendimento (Arriel et al., 2007; Majdalawieh; Massri; Nasrallah, 2017).

A ocorrência cada vez mais frequente e intensa de eventos climáticos extremos, como as secas recorrentes, representa uma das principais ameaças à produção agrícola (FAO, 2022). As plantas reagem de diferentes formas aos estresses ambientais, tratando-se do déficit hídrico, as respostas mais comuns são: fechamento estomático, perda de turgor e ajuste osmótico, redução da taxa fotossintética e diminuição das taxas de crescimento (Shao et al., 2008; Mansour et al., 2021). Portanto, melhorar a tolerância à seca é crucial não apenas para aumentar a produtividade agrícola, mais também para promover a sustentabilidade ambiental, uma vez que culturas com baixa resistência demandam muita água e fertilizantes, sobrecarregando o meio ambiente (Zhu, 2016).

Nesse contexto, a utilização de Rizobactérias Promotoras de Crescimento de Plantas (PGPR- *Plant Growth Promoting Rhizobacteria*) surge como uma alternativa promissora, pois a aplicação desses microrganismos pode ocasionar, em sementes de gergelim, um aumento significativo na porcentagem de óleo, concentração de potássio, ferro e manganês (Akhgar; Sotodeh, 2021). Ademais, as PGPR, também possibilitam maior tolerância às condições de estresse hídrico, alterando as propriedades fisiológicas relacionadas à produção de hormônios e compostos secundários (Melo et al., 2007).

As bactérias do gênero *Bacillus*, exemplos de PGPR, são capazes de manter o rendimento das culturas através de vários metabólitos. A síntese da enzima supressora de etileno (ACC deaminase), permite a esses microrganismos mitigar os efeitos nocivos do estresse abiótico, protelando a senescência da planta. Além disso, esses microrganismos estão envolvidos na regulação e absorção de nutrientes, transporte de água, antioxidantes, genes e proteínas responsivas ao estresse, podendo potencialmente induzir tolerância a condições ambientais adversas, como o estresse hídrico. (Radhakrishnan; Hashem; Abd_Allah, 2017).

Sendo assim, a inoculação de PGPR, de forma individual ou em combinações (coinoculação), pode exercer um impacto significativo no desenvolvimento das plantas (Santos et al., 2019). Contudo, a estratégia de utilizar inoculantes microbianos em consórcio tem se mostrado potencialmente mais eficiente para aumentar a produtividade das culturas (Ribeiro et al., 2022). Isso pode ser atribuído ao fato de que, em ecossistemas naturais, as bactérias vivem em comunidades complexas, onde ocorrem várias interações entre espécies distintas (Raaijmakers et al., 2009).

Portanto, é provável que a coinoculação possa otimizar o desempenho, aproveitando as interações sinérgicas existentes entre as diferentes espécies de bactérias (Maciag et al., 2023; Wu et al., 2023). Assim, diante do exposto, o presente trabalho foi conduzido com o objetivo de analisar o potencial de diferentes estirpes de bacilos, individualmente e coinoculadas, em promover o crescimento vegetativo e atenuar os efeitos do déficit hídrico em gergelim, com o intuito de identificar o tratamento mais eficaz.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Bacilos como rizobactérias promotoras do crescimento de plantas

Nos últimos anos, a produtividade das culturas tem sido drasticamente afetada por estresses bióticos e abióticos, gerando preocupações significativas sobre a produção global de alimentos (Patel; Sayyed; Patel, 2023). Neste cenário, as PGPR emergem como uma solução potencial aos desafios presentes no desenvolvimento agrícola e ambiental (Mitra et al., 2021). A utilização das PGPR pode minimizar a dependência de fertilizantes químicos e pesticidas, tornando-se um elemento crucial para a implementação de práticas agrícolas sustentáveis (Patel et al., 2021).

Originárias da rizosfera das plantas, as PGPR estabelecem uma interação mutualista com as raízes, o que resulta em efeitos benéficos tanto diretos quanto indiretos no crescimento das plantas, além de contribuir para a mitigação de estresses por meio da modificação de características fisiológicas associadas à geração de hormônios e substâncias secundárias (Melo et al., 2007; Abd_Allah et al., 2018; Hashem; Tabassum; Abd_Allah, 2019). As PGPR também possuem a capacidade de melhorar a disponibilidade de nutrientes do solo, solubilizando compostos como fosfato e potássio, fixando nitrogênio atmosférico e sintetizando sideróforos (Etesami; Maheshwari, 2018).

As PGPR, consideradas "atenuadoras de estresse abiótico", têm sido estrategicamente utilizadas para enfrentar condições ambientais desfavoráveis (Zhao et al., 2023). Dentre as PGPR, espécies do gênero *Bacillus*, particularmente conhecidas pelos efeitos estimulantes e protetores em plantas sob estresse, têm se destacado (Lastochkina, 2019). Um exemplo notável é o *Bacillus subtilis*, uma bactéria gram-positiva que possui a capacidade de formar esporos em condições adversas, como falta de nutrientes, dessecação e temperaturas que inibem o crescimento (Madigan et al., 2016).

O *B. subtilis*, frequentemente encontrado em ambientes de solo e vegetação, é um aeróbio facultativo, o que significa que pode crescer tanto em condições aeróbicas quanto anaeróbicas, especialmente na presença de nitratos. Esta bactéria estabelece uma colonização de longo prazo na rizosfera, formando um biofilme fino nas raízes, característica que permite que ela mantenha uma interação contínua com a planta hospedeira. Assim, o *B. subtilis* pode ser utilizado como biofertilizante, contribuindo para a saúde e o crescimento das plantas (Stein et al., 2002; Beauregard et al., 2013).

A colonização das raízes da planta hospedeira por *B. subtilis* resulta em benefícios para ambos, pois aproximadamente 30% do carbono fixado pelas plantas é liberado na forma de exsudatos radiculares, servindo como uma rica fonte de nutrientes para as bactérias. Em contrapartida, as plantas recebem compostos e atividades bacterianas que estimulam o crescimento e oferecem proteção contra diversos estresses (Allard-Massicotte et al., 2016).

Em um estudo realizado por Batool et al. (2020), observou-se que a inoculação com *B. subtilis* aumentou a tolerância a seca em plantas de batata ao promover o aumento da área foliar, atividades enzimáticas, teor de clorofila e teor relativo de água nas folhas, o que resultou em um crescimento e funções fisiológicas superiores em comparação com plantas não inoculadas. Junior et al. (2023) ao analisarem a inoculação com *B. subtilis* (UFMT-pant001), em soja, obtiveram um efeito positivo para a biomassa, nodulação, nutrientes nas partes aéreas, número de entrenós e comprimento das raízes nas diferentes cultivares.

Santos et al. (2024), analisaram parâmetros fisiológicos e bioquímicos na cultivar de gergelim BRS Morena inoculada com *B. subtilis* (pant001) e os resultados demonstraram que as plantas inoculadas, mesmo sob condições de déficit hídrico, exibiram um aumento nas médias de teor de fósforo, nitrogênio, massa seca da parte aérea, peso de mil sementes e número de cápsulas. A inoculação também resultou em um aumento significativo no conteúdo de clorofila nas folhas de gergelim, o que pode estar associado à capacidade do *B. subtilis* de disponibilizar nitrogênio às plantas.

Sendo assim, a aplicação de *B. subtilis* como um promotor de crescimento e um agente de controle biológico para diversas culturas agrícolas pode oferecer uma alternativa atraente, eficaz e menos agressiva ao meio ambiente em comparação com pesticidas e fertilizantes químicos. Além disso, as características biológicas do *B. subtilis* são facilmente mantidas em bioformulações, tornando-o um recurso valioso para a agricultura (Junior et al., 2023).

Portanto, a aplicação de inoculantes à base de PGPR é de fundamental relevância, pois estas bactérias, ao estabelecerem uma interação com as raízes das plantas, promovem o crescimento vegetal e auxiliam na mitigação de estresses. Ademais, desempenham um papel fundamental na resistência das culturas agrícolas face às alterações climáticas, contribuindo para a sustentabilidade da agricultura a longo prazo.

2.2 Aspectos morfológicos da cultura do gergelim

O gergelim pode ser anual ou perene e apresenta uma ampla gama de características morfológicas. A planta, quando atinge a maturidade, pode demonstrar uma variação de altura que vai de 40 cm a mais de 200 cm, com um caule ereto que pode ou não exibir alta ramificação e pelos. As folhas podem ser dispostas de maneira alternada ou oposta, sendo que as da parte inferior da planta adulta são mais largas e possuem bordas dentadas ou lobadas, enquanto as da parte superior são lanceoladas. As flores são completas, situadas nas axilas, e apresentam uma variação de 1 a 3 por axila foliar. A corola possui formato tubular, com tonalidades que vão do branco ao violeta, e é composta por um lóbulo voltado para cima e três voltados para baixo (Bedigian, 1984; Arriel et al., 2007; Andrade, 2009; Mili et al., 2021).

O fruto possui uma cápsula alongada e pilosa, que pode ser deiscente (abre-se ao atingir a maturação, espalhando as sementes pelo solo) ou indeiscente (não se abre mesmo quando atinge a maturação), com um comprimento que varia de 2 a 8 cm, dependendo da variedade. As sementes de gergelim possuem um tamanho reduzido, com cerca de 3 mm de comprimento e mil delas pesando de 2 a 4 g, dependendo da cultivar e das condições ambientais. A cor das sementes varia do preto ao branco, podendo apresentar cores intermediárias, como bege e tons de marrom (Arriel; Guedes; Pereira, 2000; Beltrão; Vieira, 2001). O sistema radicular do gergelim é pivotante e, em conjunto com suas raízes secundárias, pode atingir profundidades superiores a 1,20 m, permitindo que a planta acesse a água armazenada no subsolo, assegurando uma boa produtividade mesmo quando a disponibilidade hídrica é baixa (Arriel; Beltrão; Firmino, 2009; Su et al., 2019).

A BRS Seda, uma cultivar precoce, exibe ciclo de crescimento estimado entre 85 a 90 dias e alcança uma altura média de 1,55 m, com padrão de crescimento ramificado. Aproximadamente 36 dias após a germinação, inicia-se o florescimento, resultando em uma floração e maturação uniformes. Cada axila gera um fruto deiscente, cujas sementes de cor branca têm um conteúdo de óleo que ultrapassa 52% e um peso médio de 3,22 g para cada mil sementes. As sementes brancas são altamente valorizadas no mercado, principalmente por indústrias de alimentos e confeitarias. Ademais, a cultivar BRS Seda demonstra potencial de produtividade de 1.000 kg por hectare em condições de sequeiro (Arriel et al., 2009; Arriel et al., 2022).

2.3 O gergelim e sua importância econômica

O gergelim, cultivado globalmente em regiões tropicais e subtropicais, é altamente apreciado por suas sementes comestíveis, óleo de alta qualidade e valor comercial significativo (Arriel et al., 2007). A concentração de óleo nas sementes de gergelim pode variar de 40,80% a 60,30%, ultrapassando outras oleaginosas (Dossa et al., 2018). Além disso, o óleo de gergelim contém aproximadamente 85% de ácidos graxos insaturados, como o ácido oleico e o ácido linoléico que são conhecidos por seus benefícios à saúde humana (Teklu et al., 2022).

As sementes de gergelim, além de serem ricas em óleo, também contém componentes nutricionais únicos, incluindo altos teores de vitaminas, minerais, fibras, carboidratos e proteínas. Essas propriedades, juntamente com mudanças no estilo de vida da população mundial, têm impulsionado a demanda global por produtos saudáveis, incluindo aqueles à base de gergelim (Myint et al., 2020). O gergelim é comumente utilizado na culinária, considerado em alguns países (China, Japão e Coreia) como um alimento essencial, devido ao seu valor nutricional e à sua versatilidade em uma variedade de pratos (Xu et al., 2018; Wei et al., 2022).

A produção do gergelim, no cenário global, é mais concentrada na África e na Ásia, com Sudão, Índia e Mianmar se destacando como os principais produtores, contribuindo significativamente para o fornecimento mundial desta oleaginosa (FAOSTAT, 2022). Por ser uma cultura rentável e com demanda no mercado internacional, o gergelim também está se expandindo em países como o Brasil, impulsionado pela alta valorização no mercado global (Lima, 2021).

Os principais estados brasileiros que produzem gergelim são: Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Ceará, Piauí, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Bahia e Minas Gerais (Arriel; Beltrão, 2013). De acordo com o último censo agropecuário brasileiro realizado em 2017, o estado do Mato Grosso foi considerado o principal produtor de gergelim no Brasil, com uma produção média anual de 3901 toneladas, em uma área de 7.551 hectares. O Mato Grosso do Sul, por sua vez, ficou em segundo lugar com uma produção de 200 toneladas, em uma área de 202 hectares (IBGE, 2017).

A maior parte da produção de gergelim no Mato Grosso está concentrada nos municípios de Água Boa, Nova Xavantina e, principalmente, Canarana (Melo, 2023). A produção em Canarana e Água Boa experimentou um aumento de mais de 500% entre 2017 e

2020. Em um curto período de três anos, a área cultivada expandiu-se de 20.000 hectares em 2018 para 53.000 hectares em 2019, chegando a 100.000 hectares em 2020 (Embrapa, 2022).

As cultivares de gergelim desenvolvidas pela Embrapa, nomeadamente BRS Seda, BRS Anahí e BRS Morena, contribuíram significativamente para um impacto econômico estimado em aproximadamente R\$ 38 milhões em 2021 (Embrapa, 2022). Considerando as estimativas para a safra de 2023/24, a produção brasileira de gergelim é projetada em 174,2 mil toneladas, cultivadas em uma área estimada de 361,2 mil hectares. Portanto, as previsões destacam a crescente importância desta oleaginosa na agricultura brasileira, principalmente em cenários de clima mais seco e de riscos climáticos elevados sobre as lavouras, situações que têm favorecido culturas mais resistentes à seca, como o gergelim (CONAB, 2024).

2.4 Condições de cultivo do gergelim

O gergelim pode ser cultivado em diversos tipos de solo, mas atinge seu potencial máximo em solos bem drenados, com pelo menos 60 cm de profundidade e boa fertilidade natural. Os solos ideais são francos, variando de franco-arenosos a franco-argilosos, evitando-se solos excessivamente argilosos, pois a planta é altamente sensível a períodos de alagamento em qualquer estágio de seu desenvolvimento, por mais breve que seja. Além disso, a planta tem preferência por solos com pH em torno de 7,0, pois não suporta altos níveis de acidez ou alcalinidade excessiva, sendo sensível à salinidade, principalmente à alcalinidade, devido ao sódio trocável que pode se tornar tóxico para o metabolismo da planta, dependendo do nível de concentração (Beltrão; Vieira, 2001; Myint et al., 2020).

Em relação à absorção de nutrientes, o gergelim retira do solo quantidades significativas de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), cujos valores podem variar conforme a produção, estado nutricional, variedade cultivada e parte da planta colhida. Nos primeiros trinta dias após o plantio, o gergelim absorve quantidades relativamente pequenas de nitrogênio, fósforo e potássio (NPK). No entanto, após esse período, a demanda da planta por esses nutrientes aumenta rapidamente, atingindo o pico de necessidade de nitrogênio aos 74 dias; de fósforo entre 60 e 90 dias; e de potássio após o 35º dia, progredindo até o final do ciclo (Arriel et al., 2007).

Apesar da adaptabilidade a ambientes secos, o gergelim pode ser cultivado em regiões de clima tropical, subtropical e zonas temperadas, com uma variedade de tipos bem adaptados a essas áreas. A planta se desenvolve idealmente em temperaturas médias entre 25 °C e 30 °C, o que também é propício para a germinação das sementes. Temperaturas inferiores a 20 °C

podem retardar a germinação, e temperaturas abaixo de 10 °C podem interromper completamente o metabolismo da planta, levando à sua morte.

Adicionalmente, temperaturas superiores a 40 °C podem resultar no abortamento de flores e na falha do enchimento dos grãos. Nesse contexto, uma temperatura média de 27 °C é favorável para o crescimento vegetativo e a maturação dos frutos do gergelim. Contudo, uma redução na temperatura durante o período de maturação pode prejudicar a qualidade das sementes e do óleo, impactando negativamente os níveis de sesamina e sesamolina (Arriel et al., 2007; Arriel; Beltrão, 2023).

2.5 Comportamento fisiológico de plantas sob déficit hídrico

A disponibilidade de água é um fator essencial que influencia o crescimento, desenvolvimento e produtividade das plantas. A seca é uma das maiores ameaças à produção agrícola global, podendo reduzir os rendimentos médios em mais de 50% (Wang; Vinocur; Altman, 2003). Os eventos climáticos extremos têm intensificado este cenário, principalmente em regiões áridas e semiáridas, onde a escassez de água no solo é uma realidade que impacta diretamente o desenvolvimento e a produtividade das culturas (Kouighat et al., 2023).

A escassez de água, especialmente durante as fases críticas de crescimento, tem um impacto negativo no rendimento final das plantas. Isso ocorre porque o estresse hídrico diminui o conteúdo relativo de água na folha, a taxa de transpiração, a condutância estomática e a taxa de crescimento celular, afetando negativamente o crescimento da planta (Hafez et al., 2021). Os sinais de estresse são detectados por receptores específicos na membrana plasmática, como canais iônicos, receptores acoplados à proteína G (GPCRs) e quinases. Os GPCRs são considerados os principais sinais, ativando a sinalização subsequente. Quando um receptor é ativado devido ao estresse ou à indução de um sinal, ele regula a concentração de íons de cálcio na célula e mensageiros secundários, como o ácido abscísico (ABA) e espécies reativas de oxigênio (EROs) (Yadav et al., 2022).

Os hormônios vegetais facilitam uma variedade de respostas adaptativas e são vitais para as plantas se ajustarem a estresses ambientais, por exemplo, a produção do ABA é uma das reações mais imediatas das plantas ao estresse abiótico. As quantidades de ABA nas folhas podem se multiplicar por até 50 vezes em situações de seca, provocando o fechamento dos estômatos, diminuindo a troca de gases e inibindo a fotossíntese. O desligamento dos fotossistemas leva a produção de EROs, ocasionando vários efeitos prejudiciais nas células, incluindo danos ao DNA, interrupção da produção de proteínas, oxidação dos pigmentos que

participam da fotossíntese e peroxidação dos lipídios que compõem as membranas celulares (Taiz et al., 2017).

As EROs mais comuns são o oxigênio singlete (1O_2), o peróxido de hidrogênio (H_2O_2), o radical hidroxila (OH^\bullet) e o ânion superóxido ($O_2^{\bullet-}$) (Abogadallah, 2010). As células e compartimentos subcelulares das plantas são protegidos dos efeitos citotóxicos das EROs através do uso de enzimas antioxidantes, como superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX), bem como a osmoproteção por solutos orgânicos como a prolina (PRO) (Soares; Machado, 2007; Kouighat et al., 2024).

A SOD é uma enzima antioxidante encontrada em todas as células de organismos aeróbios, principalmente em regiões que podem ser afetadas pelo estresse oxidativo provocado pelas EROs. A função da SOD é neutralizar o ânion superóxido ($O_2^{\bullet-}$), convertendo-o em peróxido de hidrogênio (H_2O_2) por meio de um processo catalítico. A CAT, por sua vez, atua transformando o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) em água (H_2O) e oxigênio (O_2). Além das catalases, o H_2O_2 também pode ser eliminado por meio da APX (Abogadallah, 2010; Khan et al., 2020).

A prolina é um aminoácido com papel vital fundamental em plantas que enfrentam condições de estresse hídrico, pois contribui para a osmorregulação. O aumento da prolina resulta em uma elevação da pressão osmótica no citoplasma, o que favorece a retenção de água nas células vegetais, sendo crucial para a continuidade das atividades bioquímicas intracelulares. Além disso, a prolina tem um papel importante na estabilização de membranas e proteínas em condições de seca (Chi Lin; Ting Hsu; Huei Kao, 2002; Abdelkader et al., 2010).

Santos et al. (2024), analisaram a atividade de SOD, APX, CAT e PRO na cultivar de gergelim BRS Morena em resposta ao estresse hídrico. Primeiramente, na análise de PRO livre no tecido vegetal, foi observado um aumento da concentração em todos os tratamentos da condição não irrigada, sugerindo que a PRO pode desempenhar um papel importante na adaptação das plantas ao estresse hídrico. Em seguida, a análise bioquímica da atividade da SOD, APX e CAT também indicaram uma concentração mais alta para os tratamentos sob estresse hídrico, demonstrando o papel crucial destas enzimas na proteção das células contra os danos oxidativos.

Portanto, a resposta das plantas ao déficit hídrico envolve uma complexa rede de processos bioquímicos e fisiológicos. Os mecanismos, que incluem a produção de hormônios vegetais, a geração de EROs e a ativação de enzimas antioxidantes, bem como a osmoproteção por solutos orgânicos, são fundamentais para a sobrevivência das plantas em

condições de seca. A compreensão desses processos é crucial para o desenvolvimento de estratégias eficazes de manejo do estresse hídrico na agricultura, especialmente em regiões áridas e semiáridas onde a seca é uma ameaça constante.

3 METODOLOGIA

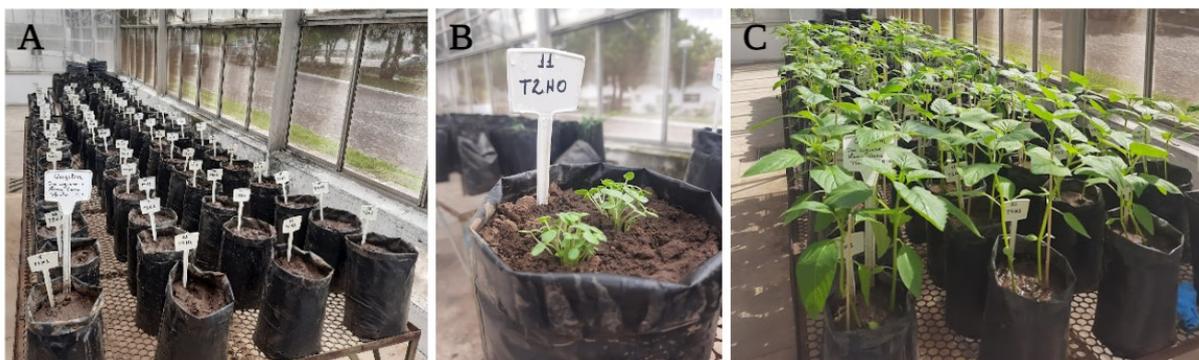
3.1 Implantação e condução do experimento em casa de vegetação

O experimento foi conduzido em casa de vegetação na Embrapa Algodão, localizada em Campina Grande, PB. Sementes do genótipo de gergelim BRS Seda foram cultivadas em vasos com capacidade de 3,5 L, preenchidos manualmente com solo de textura franca. O solo foi previamente analisado no Laboratório de Solos e Nutrição de Plantas da Embrapa Algodão e o pH não necessitou de ajustes. Para atender a recomendação de fertilização, o solo foi enriquecido com nitrogênio (N), administrado quinze dias após a emergência das plantas (15 DAE). Adicionalmente, a aplicação de fósforo (P) e potássio (K) foi realizada em todos os tratamentos, conforme as orientações de Gomes e Coutinho (1998), baseada na análise do solo.

Os tratamentos foram caracterizados em: (1) manejo com nitrogênio químico (sulfato de amônio, SAM; 21% de N) e (2) manejo com inoculantes, sendo três inoculações individuais – *B. subtilis* (pant001, cedido pela empresa Geoclean), ESA 402 e M143 (estirpes cedidas pela Embrapa Semiárido, Petrolina, PE), bem como três inoculações consorciadas - pant001x ESA 402, pant001x M143 e ESA 402 x M143, sob dois regimes hídricos (com e sem irrigação). O delineamento experimental foi inteiramente casualizado em esquema fatorial oito manejos (três inoculações individuais, três inoculações consorciadas, um manejo com nitrogênio químico - sulfato de amônia, 50 kg ha⁻¹ e um tratamento sem nitrogênio - testemunha absoluta) x dois regimes hídricos (com e sem estresse), com quatro repetições.

O experimento foi implantado em abril de 2023, foram semeadas dez sementes por vaso e após 10 dias da emergência das plântulas foi realizado o desbaste, deixando-se apenas duas plantas por vaso (Figura 1). As plantas foram irrigadas diariamente de acordo com a capacidade de campo até a fase de floração, aproximadamente 39 DAE, período em que a rega foi suspensa apenas nos tratamentos sob déficit hídrico, por 5 dias. As plantas controles foram irrigadas diariamente. Por fim, após o período de suspensão da rega, as plantas foram reidratadas e os dados agrônômicos, bem como o material vegetal para análise de fósforo e nitrogênio foram coletados.

Figura 1 – Implantação do experimento em casa de vegetação (A), emergência das plântulas (B) e plantas 23 dias após a emergência (C).



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

3.2 Cultivo das bactérias e preparo dos inoculantes

As estirpes ESA 402 e M143 foram estriadas em meio sólido LB (Luria Bertani), composto por caseína, extrato de levedura, triptona, NaCl, ágar e água destilada (Embrapa, 1999). O período de incubação foi de 24 horas a 30 °C. Em seguida, coletou-se uma colônia bacteriana de cada estirpe e inoculou-se em Erlenmeyer (250 mL) esterilizado, contendo 100 mL de meio líquido LB. Após isso, as estirpes foram incubadas em Shaker a 28 °C, 180 rpm, por 72 horas.

As sementes de gergelim foram desinfestadas com etanol puro por 30 segundos, hipoclorito de sódio 1% por 3 minutos e lavadas 10 vezes com água destilada estéril para remoção de resíduos (Vincent, 1970). Em seguida, foram divididas em grupos de acordo com seus respectivos tratamentos, colocadas em placas de Petri e imergidas em uma quantidade de inoculante suficiente para cobri-las. Após 30 minutos de embebição, as sementes foram distribuídas, com auxílio de pinças, em valas feitas manualmente no solo com aproximadamente 2 cm de profundidade. Para evitar contaminação, as pinças foram trocadas a cada inoculante. O solo foi regado horas antes do plantio das sementes inoculadas para garantir a associação das estirpes com as sementes no solo.

3.3 Variáveis agronômicas do experimento

As seguintes variáveis de crescimento foram coletadas e avaliadas: altura de planta (cm), medida da base até o ápice da haste principal; comprimento de raízes (cm); massa seca da parte aérea (g) e de raízes (g), com o material seco em estufa com circulação de ar forçada

à temperatura de 65 °C, até atingir massa constante, após a secagem o material foi pesado em balança de precisão.

3.4 Análise de nitrogênio

A avaliação do nitrogênio total da parte aérea das plantas foi realizada com base no método de digestão sulfúrica desenvolvido por Kjeldahl, conforme descrito por Bezerra Neto e Barreto (2011). Ao término do experimento, a parte aérea das plantas foi coletada, acondicionada em sacos de papel tipo kraft e colocada em estufa com circulação de ar forçada a 65 °C durante 72 horas, posteriormente triturada em moinho. Uma alíquota do material vegetal seco (2 mg), 50 mg de sulfato de sódio, 0,5 mg de sulfato de cobre (5%) e 5 mL de ácido sulfúrico foram combinados para a pré-digestão a frio à temperatura ambiente por 12 horas, em seguida, a solução foi aquecida em um bloco digestor a 350 °C até que toda a matéria orgânica estivesse dissolvida e a solução clara. Uma alíquota de 1 mL do extrato digerido foi adicionada em um balão volumétrico (50 mL) contendo 40 mL de água deionizada, 1 mL de hidróxido de sódio (10%), 1 mL de silicato de sódio (10%) e 2 mL do reagente de Nessler, o volume foi completado com água deionizada para 50 mL. A leitura foi realizada em espectrofotômetro no comprimento de onda de 410 nm. A partir do teor de nitrogênio foi calculado o nitrogênio acumulado na parte aérea, multiplicando o teor de nitrogênio pela massa seca da parte aérea, de acordo com Alcantara et al. (2014).

3.5 Análise de fósforo

A análise de fósforo da parte aérea das plantas foi realizada com base no procedimento descrito por Silva (2009). Ao final do experimento, a parte aérea das plantas foi coletada e submetida a uma estufa com circulação de ar forçada a 65 °C durante 72 horas, após o qual foi moída em um moinho de facas. Uma alíquota de material vegetal seco (2 mg), 50 mg de sulfato de sódio, 0,5 mg sulfato de cobre (5%) e 5 mL de ácido sulfúrico foram misturados para a pré-digestão a frio à temperatura ambiente por 12 horas, após o qual a solução foi aquecida em um bloco digestor a 350 °C até que toda a matéria orgânica estivesse dissolvida e a solução clara. Uma alíquota de 1 mL do extrato digerido foi adicionada a um balão volumétrico (50 mL) contendo 40 mL de água deionizada, 1 mL de hidróxido de sódio (10%), 1 mL de silicato de sódio (10%) e 2 mL do reagente de Nessler, o volume foi completado com

água deionizada para 50 mL. A leitura foi realizada em espectrofotômetro no comprimento de onda de 660 nm.

3.6 Análises estatísticas

Os dados dos experimentos foram analisados usando o programa estatístico SISVAR versão 5.6 (Ferreira, 2014), submetidos à análise de variância ($P \leq 0,05$) e as médias comparadas pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Os gráficos foram gerados utilizando o software GraphPad Prism versão 10.1.2.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

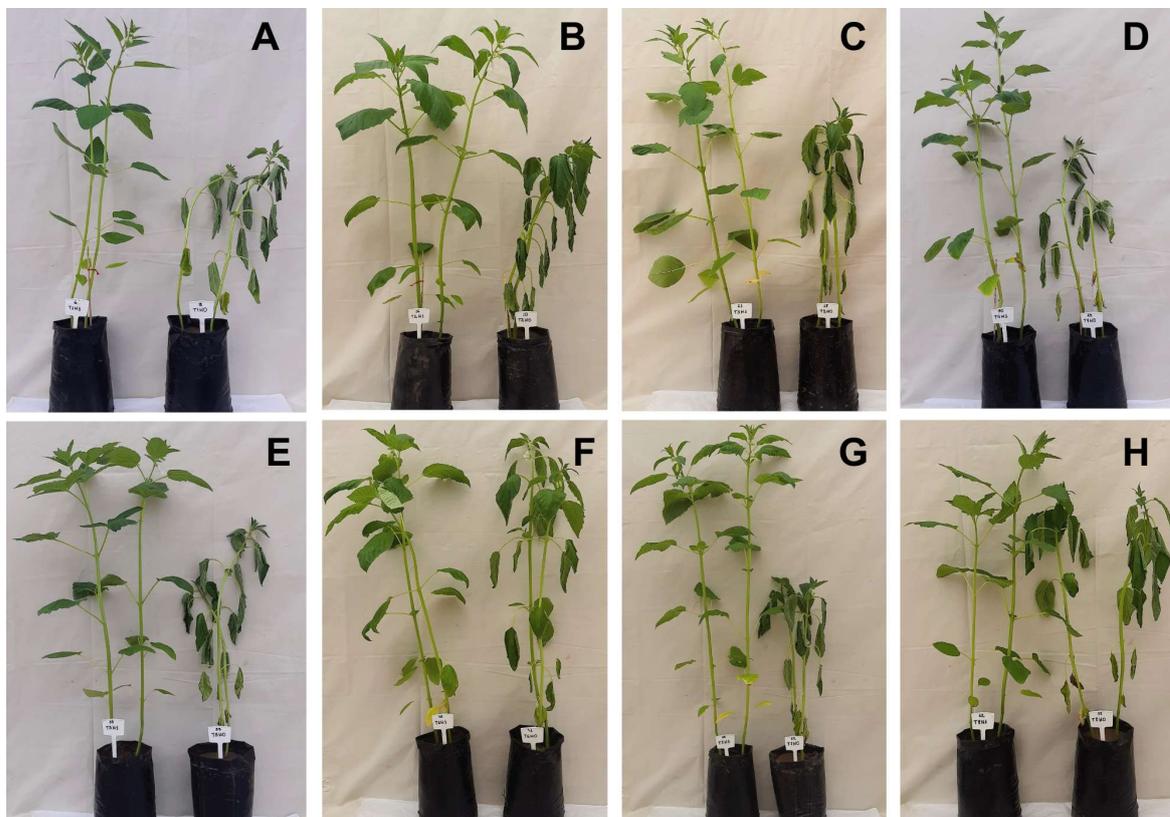
O genótipo BRS Seda demonstrou germinação em grande parte dos tratamentos, no terceiro dia subsequente à semeadura. Notadamente, os tratamentos que receberam inoculação isolada de *B.subtilis* (pant001), juntamente com suas combinações, exibiram uma germinação mais tardia, ocorrendo até quatro dias após os demais tratamentos. No que concerne à fase de floração, seu início foi observado no trigésimo segundo dia após a emergência das plantas (32 DAE), culminando numa floração completa no trigésimo nono dia (39 DAE).

O estudo da ecofisiologia do gergelim, conduzido por Albuquerque et al. (2012), demonstrou que o processo de germinação das sementes apresenta variabilidade sensível conforme as condições edafoclimáticas, ocorrendo em um intervalo que abrange do 3º ao 6º dia. Por sua vez, a etapa de floração ocorre geralmente entre o 35º e o 60º dia após a semeadura. Os resultados obtidos no presente estudo mostraram uma discrepância em relação à fase de floração, que ocorreu três dias antes do esperado.

No contexto da interrupção da irrigação, observou-se que as plantas sujeitas a condições de estresse hídrico manifestaram evidentes sintomas de desidratação. No quarto dia após a suspensão da rega, o contraste entre os diferentes tratamentos era notável. Enquanto os tratamentos submetidos à irrigação adequada exibiam um aspecto saudável, caracterizado por folhas eretas, as plantas submetidas ao estresse hídrico revelavam claros sinais de murchamento foliar (Figura 2). Contudo, notou-se que as plantas tratadas com a coinoculação pant001 x ESA 402 apresentaram sintomas mais leves de desidratação (Figura 2F).

O comportamento foi coerente com o esperado, uma vez que a privação de água impacta diretamente os processos fisiológicos das plantas, resultando em respostas visíveis de ajustamento, como o fechamento estomático, a perda de turgor e o ajuste osmótico, além da redução na taxa fotossintética. A condição de seca também desencadeia a geração de EROs, as quais ocasionam danos oxidativos em diversas macromoléculas essenciais, resultando na diminuição das taxas de crescimento das plantas (Shao et al., 2008; Laxa et al., 2019; Corpas; González-Gordo; Palma, 2020).

Figura 2 - Plantas do genótipo BRS Seda de gergelim irrigadas (à esquerda) e sob restrição hídrica (à direita). (A) sem nitrogênio, (B) com nitrogênio, (C) pant001, (D) ESA 402, (E) M143, (F) pant001 x ESA 402, (G) pant001 x M143, (H) ESA 402 x M143.



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Após o período de suspensão da rega e reidratação das plantas, as variáveis foram analisadas. Ao observar os dados, mais especificamente a interação entre o regime hídrico e os inoculantes, constatou-se que a altura das plantas, a massa seca das raízes, o comprimento das raízes e o nitrogênio acumulado na parte aérea foram estatisticamente significativos, enquanto o fósforo e a massa seca da parte aérea, não demonstraram significância (Tabela 1).

Segundo Gomes (1990), o coeficiente de variação (CV) atua como um medidor da acurácia de um experimento, podendo ser categorizado da seguinte forma: é considerado baixo se for inferior a 10%, médio se estiver no intervalo de 10% a 20%, alto se variar de 20% a 30% e muito alto se exceder 30%. Contudo, Steel et al. (1997) afirma que para determinar se o valor do CV de um experimento é considerado alto ou baixo, é essencial que o pesquisador possua conhecimento e experiência tanto com a espécie que está sendo estudada quanto com os resultados de experimentos similares. Nesta conjuntura, Santos (2022) ao realizar um estudo com a cultivar de gergelim BRS Morena sob condições de déficit hídrico e inoculação com bacilos, encontrou coeficientes de variação que se assemelham aos do

presente trabalho para as seguintes características: altura (10,58%), massa seca da parte aérea (19,91%) e fósforo (18,96%).

Tabela 1 - Resumo das análises de variância (ANOVA) e contrastes para as variáveis altura de plantas (ALT - cm), massa seca da parte aérea (MSPA - g), massa seca de raiz (MSR - g), comprimento da raiz (CR - cm), fósforo (P - dag kg⁻¹) e nitrogênio acumulado na parte aérea (NPA - dag kg⁻¹), no genótipo BRS Seda de gergelim inoculado com bacilos, sob restrição hídrica.

Fonte de Variação	GL	Variáveis					
		ALT	MSPA	MSR	CR	P	NPA
Regime Hídrico	1	5159,9080**	29,4984**	3,9551**	6,5792 ^{ns}	0,0272**	496,1756**
Tratamentos	7	270,6126**	2,1695**	0,4837**	46,7814**	0,0601**	148,5078**
Regime Hídrico x Tratamentos	7	183,0847**	0,4736 ^{ns}	0,4935**	23,4270**	0,0030 ^{ns}	21,415836**
Erro	48	38,3333	0,7043	0,1248	2,9094	0,0015	6,637820
CV (%)		7,54	19,04	30,09	13,13	18,68	15,65

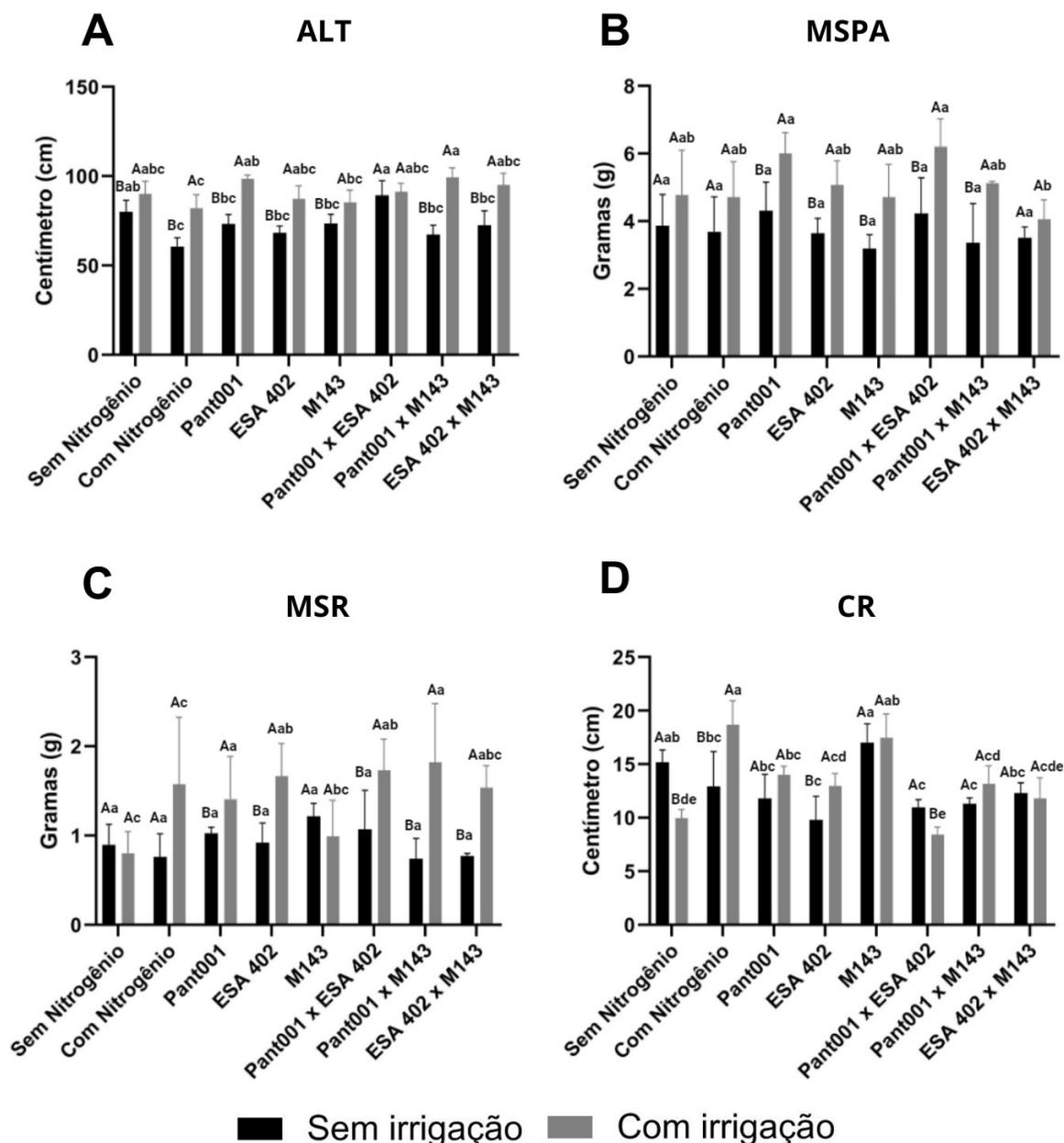
Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

ns – não significativo; ** significativo (P≤0,01).

Ao analisar o desdobramento de inoculantes em relação à altura de planta (Figura 3A), na condição não irrigada, verificou-se uma variação das médias entre 60,66 cm (com nitrogênio) e 89,33 cm (pant001 x ESA 402). Por sua vez, sob a condição irrigada, a variação estendeu-se de 82,00 cm (com nitrogênio) a 99,33 cm (pant001 x M143). Dentre os tratamentos da condição não irrigada, embora pant001 x ESA 402 tenha demonstrado uma média de altura superior, essa diferença não foi estatisticamente relevante em comparação ao tratamento sem nitrogênio. De maneira análoga, nos tratamentos da condição irrigada, percebe-se que o tratamento pant001 x M143 exibiu uma média superior, entretanto, também não diferiu estatisticamente quando comparado ao tratamento sem nitrogênio.

Dessa forma, no que diz respeito à altura das plantas, os resultados sugerem que a inoculação com bacilos não teve um efeito pronunciado sob as condições deste experimento. No entanto, pesquisas recentes, como a conduzida por Jabborova et al. (2021), oferecem uma perspectiva diferente, demonstrando que a inoculação com *B. subtilis* resultou em um aumento notável na altura das plantas de gengibre, ressaltando seu potencial como um poderoso agente promotor de crescimento e até mesmo como um biofertilizante eficaz. Ademais, de acordo com Blake, Christensen e Kovács (2021), *B. subtilis* desempenha uma série de funções benéficas que promovem o crescimento das plantas, incluindo aprimorar a disponibilidade de nutrientes, aliviar estresses abióticos e produzir fitormônios que promovem o crescimento.

Figura 3 - Análise das variáveis agrônômicas do genótipo de gergelim BRS Seda inoculado com bacilos, sob restrição hídrica. (A) Altura de plantas (ALT), (B) massa seca da parte aérea (MSPA), (C) massa seca de raiz (MSR) e (d) comprimento da raiz (CR). Letras minúsculas comparam os tratamentos; letras maiúsculas comparam os regimes hídricos dentro de cada tratamento.



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A massa seca da parte aérea (Figura 3B), na condição sem irrigação, apresentou médias que variaram entre 3,18 g (M143) e 4,31 g (pant001), não demonstrando diferença significativa entre os tratamentos. Já sob a condição de irrigação, a variação das médias situou-se entre 4,05 g (ESA 402 x M143) e 6,20 g (pant001 x ESA 402), sendo este último tratamento o que apresentou a maior média e não diferiu estatisticamente quando comparado ao tratamento sem nitrogênio (4,78 g).

Lima (2023), ao avaliar a interação de inoculantes à base de bacilos em gergelim sob condições de déficit hídrico, observou que, para a massa seca da parte aérea, no genótipo BRS Anahi, tanto na condição irrigada quanto na não irrigada, os tratamentos que foram inoculados com bacilos exibiram as maiores médias, apresentando efeitos positivos quando comparados à testemunha absoluta. Buchelt et al. (2019) avaliaram a inoculação de *B. subtilis* em cultura de milho e observaram que a aplicação ocasionou um aumento na massa seca da parte aérea. Esse processo ocorreu, provavelmente, devido ao maior tempo de contato do microrganismo com as raízes, aumentando a colonização e favorecendo o crescimento e o desenvolvimento das plantas.

Tratando-se da massa seca da raiz (Figura 3C), na condição não irrigada, as médias variaram entre 0,74 g (pant001 x M143) e 1,21 g (M143), não apresentando diferença significativa entre os tratamentos. A condição irrigada, por sua vez, apresentou significância, com uma variação de médias de 0,80 g (sem nitrogênio) a 1,96 g (pant001), sendo que o tratamento sem nitrogênio apresentou a menor média, enquanto os tratamentos pant001 x M143 e pant001 apresentaram as maiores médias diferenciando-se estatisticamente de M143, com nitrogênio e sem nitrogênio. Os tratamentos apresentaram diferença significativa, principalmente aqueles que envolveram pant001 e suas combinações, pois apresentaram médias mais altas para a variável massa seca da raiz.

As PGPR têm a capacidade de aumentar o comprimento e a densidade das raízes, o que auxilia a absorção de nutrientes e água, impulsionando a produtividade das colheitas e mantendo o equilíbrio osmótico na planta hospedeira por meio do conteúdo relativo de água (Vurukonda et al., 2016). Aquino et al. (2019) demonstraram que os isolados de *B. subtilis* contribuíram significativamente para o aumento da massa seca da raiz em plantas de milho e sorgo. Fonseca et al. (2022), ao analisar a atividade de *B. subtilis* em cana-de-açúcar sob estresse hídrico, evidenciou que a inoculação desse microrganismo promoveu o aumento de parâmetros de crescimento, como o comprimento e a biomassa das raízes. Assim, os achados são consistentes com o presente estudo, que também observou que os tratamentos envolvendo *B. subtilis* e suas combinações resultaram em médias significativamente mais altas para a variável de massa seca da raiz.

Ao estudar o comprimento das raízes (Figura 3D), na condição não irrigada observou-se que as médias variaram entre 9,83 cm (ESA 402) e 17,00 cm (M143), enquanto na condição irrigada a variação foi de 8,43 cm (pant001 x ESA 402) a 18,70 cm (com nitrogênio). Dentre os tratamentos da condição não irrigada, embora M143 tenha demonstrado um comprimento de raiz superior aos demais, essa diferença não foi estatisticamente relevante

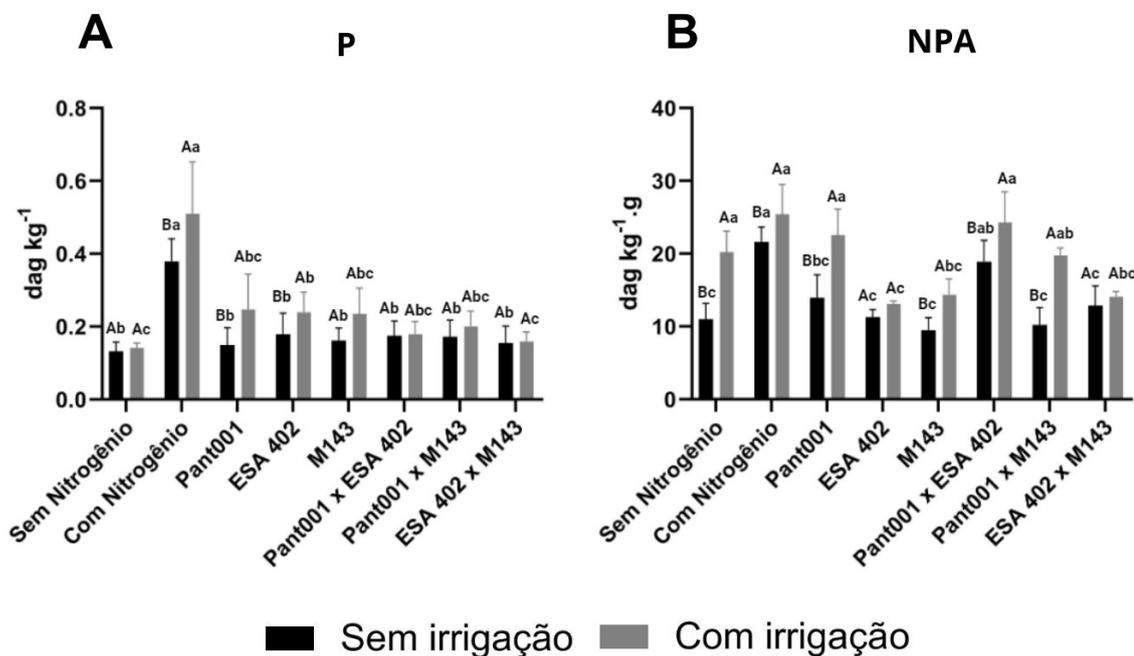
em comparação ao tratamento sem nitrogênio (15,16 cm). Os tratamentos da condição irrigada, com nitrogênio e M143 apresentaram as maiores médias, sendo que com nitrogênio diferiu estatisticamente em relação aos demais tratamentos.

Ali et al. (2022), ao investigarem a influência de cepas de *Bacillus* na promoção do crescimento vegetal em plantas de arroz, sob condições de estresse salino, notou que a cepa NMTD17 teve um impacto notável, aumentando os parâmetros morfológicos das raízes das plantas - incluindo o comprimento total das raízes, volume, diâmetro e a área superficial - em 2 a 3 vezes, quando comparado com as plantas controle. Ashajyothi et al. (2024), demonstraram que a inoculação de sementes de milho com *B. subtilis* e *B. paralicheniformis* resultou em um aumento significativo no comprimento das raízes e dos brotos.

A análise de fósforo (P) (Figura 4A), na condição não irrigada, variou entre as médias 0,13 dag Kg⁻¹ (pant001) e 0,38 dag Kg⁻¹ (com nitrogênio), enquanto na condição irrigada a variação foi de 0,14 dag Kg⁻¹ (sem nitrogênio) a 0,45 dag Kg⁻¹ (com nitrogênio). Dentre os tratamentos da condição não irrigada, com nitrogênio apresentou a maior média e diferiu estatisticamente dos demais tratamentos. A condição irrigada, demonstrou que o tratamento com nitrogênio também apresentou a maior média diferindo dos demais tratamentos, seguido do tratamento ESA 402.

O fósforo é um elemento crucial para as plantas, atuando em processos como fotossíntese, respiração, e formação de ácidos nucleicos e membranas (Hawkesford et al., 2023). A distribuição e disponibilidade do fósforo pode ser influenciada pela adubação nitrogenada, pois as adições de nitrogênio influenciam o metabolismo das plantas, podendo modificar a habilidade de áreas específicas da superfície radicular para absorver fósforo. Além disso, a forma amoniacal de nitrogênio tende a intensificar a absorção de fósforo em comparação a forma de nitrato (Grunes, 1959; Leite et al., 2016).

Figura 4 - Análise das variáveis químicas do genótipo BRS Seda de gergelim inoculado com bacilos, sob restrição hídrica. (A) Fósforo (P) e (B) nitrogênio acumulado na parte aérea (NPA). Letras minúsculas comparam os tratamentos; letras maiúsculas comparam os regimes hídricos dentro de cada tratamento.



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Ao analisar as médias da variável nitrogênio acumulado na parte aérea (Figura 4B), na condição não irrigada, é possível observar que houve variação entre 9,52 dag Kg⁻¹ (M143) e 21,61 dag Kg⁻¹ (com nitrogênio), enquanto na condição irrigada a variação foi de 13,10 dag Kg⁻¹ (ESA 402) a 25,46 dag Kg⁻¹ (com nitrogênio). Dentre os tratamentos da condição não irrigada, com nitrogênio apresentou a maior média, mas não diferiu estatisticamente de pant001 x ESA 402. A condição irrigada, demonstrou que o tratamento com nitrogênio também apresentou a maior média, mas não diferiu estatisticamente de pant001 x ESA 402, pant001, sem nitrogênio e pant001 x M143.

Um estudo conduzido por Zenawi e Mizan (2019) demonstrou que a aplicação de fertilizantes nitrogenados tem um impacto significativo tanto no crescimento quanto na produtividade do gergelim. Este fenômeno ocorre porque o nitrogênio disponível influencia a divisão celular, afetando vários aspectos do desenvolvimento vegetal, sendo requerido para a síntese de componentes fundamentais, como proteínas e óleos armazenados nas sementes (Arriel et al., 2007; Silva et al., 2009).

No entanto, as formas biodisponíveis de nutrientes vitais, como fósforo e nitrogênio, são limitadas na rizosfera. Nesse contexto, *Bacillus* spp. desempenha um papel crucial ao facilitar a transformação desses nutrientes essenciais de formas complexas para formas

simples e prontamente acessíveis (Radhakrishan; Hashem; Abd_Allah, 2017; Tsotetsi et al., 2022). Isso é corroborado pelos dados da condição não irrigada, onde o tratamento pant001 x ESA 402 não diferiu significativamente do tratamento com nitrogênio, ambos apresentando as maiores médias.

Portanto, os resultados obtidos durante a pesquisa, para a germinação, floração, variáveis agronômicas e químicas revelaram padrões intrigantes, demonstrando que a coinoculação com esses microrganismos pode desencadear respostas complexas nas plantas, influenciando aspectos variados do seu crescimento e desenvolvimento. A discrepância observada na fase de germinação, embora não tenha comprometido o subsequente desenvolvimento das plantas, destaca a importância de considerar os efeitos temporais e específicos do tratamento nas diferentes fases do ciclo de vida da planta.

Além disso, os resultados também revelaram a importância do estresse hídrico como fator determinante para o desempenho das plantas. O contraste visível entre as plantas irrigadas e as submetidas ao estresse sublinha a vulnerabilidade das culturas a esse fator e reforça a importância da busca por estratégias de mitigação, como a coinoculação com microrganismos benéficos.

5 CONCLUSÃO

Os resultados revelaram uma interação complexa entre os bacilos e as plantas. Enquanto algumas variáveis, como a massa seca da parte aérea e o teor de fósforo, não apresentaram diferenças significativas, as variáveis de massa seca da raiz, comprimento de raiz e nitrogênio acumulado na parte aérea sugerem que os inoculantes podem influenciar positivamente o sistema radicular e o teor de nitrogênio.

A observação conjunta dos aspectos de crescimento e composição química das plantas, em resposta aos diferentes tratamentos, revela maiores médias e significância em plantas com pant001 e suas combinações. Esses resultados são relevantes para o uso potencial de inoculantes a base de pant001 como uma estratégia promissora para otimizar o crescimento vegetativo e a tolerância ao estresse hídrico em plantas de gergelim. No entanto, investigações mais aprofundadas são necessárias para compreender os mecanismos e validar a potencialidade desses inoculantes em cenários de produção agrícola.

REFERÊNCIAS

- ABD_ALLAH, E. F. *et al.* Endophytic bacterium *Bacillus subtilis* (BERA 71) improves salt tolerance in chickpea plants by regulating the plant defense mechanisms. **Journal of Plant Interactions**, [S. l.], v. 13, n. 1, p. 37–44, 1 jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17429145.2017.1414321>. Acesso em: 22 mar. 2024.
- ABDELKADER, A. F. *et al.* Screening the bio-safety of wheat produced from pretreated grains to enhance tolerance against drought using physiological and spectroscopic methods. **Food and Chemical Toxicology**, [S. l.], v. 48, n. 7, p. 1827–1835, 1 jul. 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278691510002292>. Acesso em: 15 abr. 2024.
- ABOGADALLAH, G. M. Insights into the significance of antioxidative defense under salt stress. **Plant Signaling & Behavior**, [S. l.], v. 5, n. 4, p. 369–374, 1 abr. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.4161/psb.5.4.10873>. Acesso em: 15 abr. 2024.
- AKHGAR, A.; SOTODEH, P. Effect of combined application of vermicompost and plant growth promoting rhizobacteria on seed yield in Sesame. **Journal of Crops Improvement**, [S. l.], v. 23, n. 4, p. 838–823, 22 dez. 2021. Disponível em: https://jci.ut.ac.ir/article_83058_en.html. Acesso em: 27 abr. 2024.
- ALBUQUERQUE, F. A. *et al.* Ecofisiologia do gergelim (*Sesamun indicum* L.). In: BELTRÃO, N. E. M.; OLIVEIRA, M. I. P. **Ecofisiologia das culturas de algodão, amendoim, gergelim, mamona, pinhão-manso e sisal**. Brasília: Embrapa, 2012. p. 173-207.
- ALCANTARA, R. M. C. M. D. *et al.* Eficiência simbiótica de progenitores de cultivares brasileiras de feijão-caupi. **Revista Ciência Agronômica**, [S. l.], v. 45, n. 1, p. 1–9, mar. 2014.
- ALI, Q. *et al.* Revealing plant growth-promoting mechanisms of *Bacillus* strains in elevating rice growth and its interaction with salt stress. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 13, 2 set. 2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2022.994902/full>. Acesso em: 28 abr. 2024.
- ALLARD-MASSICOTTE, R. *et al.* *Bacillus subtilis* Early Colonization of Arabidopsis thaliana Roots Involves Multiple Chemotaxis Receptors. **mBio**, [S. l.], v. 7, n. 6, p. e01664-16, 30 dez. 2016. Disponível em: <https://journals.asm.org/doi/10.1128/mBio.01664-16>. Acesso em: 22 mar. 2024.
- ANDRADE, P. B. D. **Potenciais polinizadores e requerimentos de polinização do gergelim (*Sesamum indicum*)**. 2009. 75 f. Dissertação – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.
- AQUINO, J. P. A. de *et al.* Plant growth-promoting endophytic bacteria on maize and sorghum. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [S. l.], v. 49, p. e56241, 25 nov. 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pat/a/XDWTzjPhNxjw7Nkq3RHTqKp/?lang=en&format=html>. Acesso em: 28 abr. 2024.

ARRIEL, N. H. C et al. **A cultura do gergelim**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Campina Grande: Embrapa Algodão, 2007.

ARRIEL, N. H. C et al. **Cultivares**. 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/gergelim/pre-producao/caracteristicas-das-especies-e-relacoes-com-o-ambiente/cultivares>. Acesso em: 18 mar. 2024.

ARRIEL, N. H. C et al. **Gergelim BRS Seda**. 2009. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/25691/1/FolderBRSSeda3edicao.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2024.

ARRIEL, N. H. C.; BELTRÃO, N. E. M. **Cultivo do gergelim**. Sistema de produção Embrapa, 2013. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1155372>. Acesso em: 13 de mar 2024.

ARRIEL, N. H. C.; BELTRÃO, N. E. M.; FIRMINO, P. T. **Gergelim: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Campina Grande: Embrapa Algodão, 2009, 209p.

ARRIEL, N. H. C.; GUEDES, A. R.; PEREIRA, J. R. Descrição Botânica e Técnicas de Polinização Controlada no Gergelim (*Sesamum Indicum* L.). **Embrapa Algodão**, v. 1, n. 113, p. 1–5, 2000.

ASHAJYOTHI, M. *et al.* Comprehensive genomic analysis of *Bacillus subtilis* and *Bacillus paralicheniformis* associated with the pearl millet panicle reveals their antimicrobial potential against important plant pathogens. **BMC Plant Biology**, [S. l.], v. 24, n. 1, p. 197, 18 mar. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04881-4>. Acesso em: 28 abr. 2024.

BATOOL, T. *et al.* Plant growth promoting rhizobacteria alleviates drought stress in potato in response to suppressive oxidative stress and antioxidant enzymes activities. **Scientific Reports**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 16975, 12 out. 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-73489-z>. Acesso em: 22 mar. 2024.

BEAUREGARD, P. B. *et al.* *Bacillus subtilis* biofilm induction by plant polysaccharides. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [S. l.], v. 110, n. 17, p. E1621–E1630, 23 abr. 2013. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1218984110>. Acesso em: 22 mar. 2024.

BEDIGIAN, D. **Sesamum indicum L.: crop origin, diversity, chemistry and ethnobotany**. 1984. Dissertação – University of Illinois at Urbana-Champaign, 1984.

BELTRÃO, N.E.M.; VIEIRA, D.J. **O agronegócio do gergelim no Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2001. p.121-160. 348p.

BLAKE, C.; CHRISTENSEN, M. N.; KOVÁCS, Á. T. Molecular Aspects of Plant Growth Promotion and Protection by *Bacillus subtilis*. **Molecular Plant-Microbe Interactions**, [S. l.], v. 34, n. 1, p. 15–25, jan. 2021. Disponível em:

<https://apsjournals.apsnet.org/doi/full/10.1094/MPMI-08-20-0225-CR>. Acesso em: 28 abr. 2024.

BUHELDT, A. C. *et al.* Aplicação de Bioestimulantes e *Bacillus Subtilis* na Germinação e Desenvolvimento Inicial da Cultura do Milho. **Revista De Agricultura Neotropical**, [S. l.], v. 6, n. 4, p. 69–74, 19 dez. 2019. Disponível em: <https://periodicosonline.uems.br/index.php/agrineo/article/view/2762>. Acesso em: 28 abr. 2024.

CHI LIN, C.; TING HSU, Y.; HUEI KAO, C. The effect of NaCl on proline accumulation in rice leaves. **Plant Growth Regulation**, [S. l.], v. 36, n. 3, p. 275–285, 1 mar. 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1016518013449>. Acesso em: 15 abr. 2024.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. v.11 - Safra 2023/24, n.6 - Sexto Levantamento, Brasília, p. 1-124, mar 2024.

CORPAS, F. J.; GONZÁLEZ-GORDO, S.; PALMA, J. M. Plant Peroxisomes: A Factory of Reactive Species. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 11, 3 jul. 2020. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plantscience/articles/10.3389/fpls.2020.00853/full>. Acesso em: 20 abr. 2024.

DOSSA, K. *et al.* Near-infrared reflectance spectroscopy reveals wide variation in major components of sesame seeds from Africa and Asia. **The Crop Journal**, [S. l.], v. 6, n. 2, p. 202–206, 1 abr. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214514117301149>. Acesso em: 13 de mar 2024.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Protocolos para preparo de meios de cultura da Embrapa Agrobioenergia, dezembro, 1999.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Relatório de avaliação dos impactos das soluções tecnológicas geradas pela Embrapa**. 2022. Disponível em: https://bs.sede.embrapa.br/2021/relatorios/algodao_gergelim.pdf. Acesso em: 18 de mar 2024.

ETESAMI, H.; MAHESHWARI, D. K. Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: Action mechanisms and future prospects. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, [S. l.], v. 156, p. 225–246, 30 jul. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651318301921>. Acesso em: 22 mar. 2024.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Faostat**: statistical database. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>. Acesso em: 27 abr. 2024.

FAO *et al.* **The State of Food Security and Nutrition in the World 2022**. Roma: FAO ; IFAD ; UNICEF ; WFP ; WHO, 2022. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cc0639en>. Acesso em: 27 abr. 2024.

FERREIRA, D.F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, p. 109-112, 2014.

FONSECA, M. de C. da *et al.* Bacillus subtilis Inoculation Improves Nutrient Uptake and Physiological Activity in Sugarcane under Drought Stress. **Microorganisms**, [S. l.], v. 10, n. 4, p. 809, abr. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-2607/10/4/809>. Acesso em: 28 abr. 2024.

GOMES, F. P. Curso de estatística experimental. 13. ed. Piracicaba: Nobel/USP-ESALQ, 1990. 468 p.

GOMES, R. V.; COUTINHO, J. L. B. Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco (2ª aproximação). 2.ed. Recife, IPA, p. 144, 1998.

GRUNES, D. L. Effect of Nitrogen on the Availability of Soil and Fertilizer Phosphorus to Plants. In: NORMAN, A. G. (org.). **Advances in Agronomy**. [S. l.]: Academic Press, 1959. v. 11, p. 369–396.

HAFEZ, E. M. *et al.* Minimizing the Adversely Impacts of Water Deficit and Soil Salinity on Maize Growth and Productivity in Response to the Application of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria and Silica Nanoparticles. **Agronomy**, [S. l.], v. 11, n. 4, p. 676, abr. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/4/676>. Acesso em: 15 abr. 2024.

HASHEM, A.; TABASSUM, B.; ABD_ALLAH, F. E. Bacillus subtilis: A plant-growth promoting rhizobacterium that also impacts biotic stress. **Saudi Journal of Biological Sciences**, [S. l.], v. 26, n. 6, p. 1291–1297, 1 set. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319562X19300890>. Acesso em: 22 mar. 2024.

HAWKESFORD, M. J. *et al.* Functions of macronutrients. In: RENGEL, Z.; CAKMAK, I.; WHITE, P. J. (org.). **Marschner's Mineral Nutrition of Plants (Fourth Edition)**. San Diego: Academic Press, 2023. p. 201–281. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128197738000198>. Acesso em: 28 abr. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) – Censo Agropecuário. Sidra, 2017. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censoagropecuario-2017>. Acesso em: 13 de mar 2024.

JABBOROVA, D. *et al.* Plant growth promoting bacteria Bacillus subtilis promote growth and physiological parameters of Zingiber officinale Roscoe. **Plant Science Today**, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 66–71, 1 jan. 2021. Disponível em: <https://horizonpublishing.com/journals/index.php/PST/article/view/997>. Acesso em: 28 abr. 2024.

JUNIOR, A. F. C. *et al.* Efficient dose of Bacillus subtilis UFMT-Pant001 as a plant growth promoter in soybean under greenhouse conditions. **Observatório de La Economía Latinoamericana**, [S. l.], v. 21, n. 6, p. 5107–5125, 29 jun. 2023. Disponível em: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/790>. Acesso em: 22 mar. 2024.

KHAN, N. *et al.* Crosstalk amongst phytohormones from planta and PGPR under biotic and abiotic stresses. **Plant Growth Regulation**, [S. l.], v. 90, n. 2, p. 189–203, 1 mar. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10725-020-00571-x>. Acesso em: 15 abr. 2024.

KOUIGHAT, M. *et al.* Drought-tolerant sesame mutant lines assessed by physiological traits and stress indices under water deficit conditions. **Journal of Agriculture and Food Research**, [S. l.], v. 14, p. 100842, 1 dez. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666154323003496>. Acesso em: 15 abr. 2024.

KOUIGHAT, M. *et al.* Exploring mechanisms of drought-tolerance and adaptation of selected sesame mutant lines. **Journal of Agriculture and Food Research**, [S. l.], v. 15, p. 100911, 1 mar. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666154323004180>. Acesso em: 15 abr. 2024.

LASTOCHKINA, O. Bacillus subtilis-Mediated Abiotic Stress Tolerance in Plants. *In*: ISLAM, M. T. *et al.* (org.). **Bacilli and Agrobiotechnology: Phytostimulation and Biocontrol: Volume 2**. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 97–133. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-15175-1_6. Acesso em: 22 mar. 2024.

LAXA, M. *et al.* The Role of the Plant Antioxidant System in Drought Tolerance. **Antioxidants**, [S. l.], v. 8, n. 4, p. 94, abr. 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3921/8/4/94>. Acesso em: 20 abr. 2024.

LEITE, J. N. F. *et al.* Frações orgânicas e inorgânicas do fósforo no solo influenciadas por plantas de cobertura e adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S. l.], v. 51, p. 1880–1889, nov. 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/CMFP7CtmTsz5z3c4xPZDV3Q/>. Acesso em: 28 abr. 2024.

LIMA, G. B. P. de *et al.* Bacilli Rhizobacteria as Biostimulants of Growth and Production of Sesame Cultivars under Water Deficit. **Plants**, [S. l.], v. 12, n. 6, p. 1337, jan. 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/12/6/1337>. Acesso em: 13 de mar 2024.

LIMA, G. B. P. **Rizobactérias promotoras de crescimento e mitigação da restrição hídrica em gergelim**. 2021. 75 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - PPGCA) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2021.

MACIAG, T. *et al.* Microbial Consortia for Plant Protection against Diseases: More than the Sum of Its Parts. **International Journal of Molecular Sciences**, [S. l.], v. 24, n. 15, p. 12227, jan. 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1422-0067/24/15/12227>. Acesso em: 27 abr. 2024.

MADIGAN, M. T. *et al.* **Microbiologia de Brock**. 14. ed. Porto Alegre: Artmed Editora, 2016.

MAJDALAWIEH, A. F.; MASSRI, M.; NASRALLAH, G. K. A comprehensive review on the anti-cancer properties and mechanisms of action of sesamin, a lignan in sesame seeds (*Sesamum indicum*). **European Journal of Pharmacology**, [S. l.], v. 815, p. 512–521, 15 nov. 2017. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0014299917306702>. Acesso em: 27 abr. 2024.

MANSOUR, E. *et al.* Enhancement of drought tolerance in diverse *Vicia faba* cultivars by inoculation with plant growth-promoting rhizobacteria under newly reclaimed soil conditions. **Scientific Reports**, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 24142, 17 dez. 2021. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-02847-2>. Acesso em: 27 abr. 2024.

MELO, H. C. de *et al.* Anatomical and physiological alterations in *Setaria anceps* Stapf ex Massey and *Paspalum paniculatum* L. under water deficit conditions. **Hoehnea**, [S. l.], v. 34, p. 145–153, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hoehnea/a/CyQQszxg7mCzdCHLP5fCkCz/abstract/?lang=en&format=html>. Acesso em: 27 abr. 2024.

MELO, M. O. L. Barreiras não tarifárias fitossanitárias: Abertura do mercado de gergelim. **Revista de Política Agrícola**, v. 32, n. 2, p. 31, 2023.

MILI, A. *et al.* A comprehensive review on *Sesamum indicum* L.: Botanical, ethnopharmacological, phytochemical, and pharmacological aspects. **Journal of Ethnopharmacology**, [S. l.], v. 281, p. 114503, 5 dez. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378874121007327>. Acesso em: 22 mar. 2024.

MITRA, D. *et al.* Amelioration of thermal stress in crops by plant growth-promoting rhizobacteria. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, [S. l.], v. 115, p. 101679, 1 ago. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0885576521000801>. Acesso em: 22 mar. 2024.

MYINT, D. *et al.* Sustainable Sesame (*Sesamum indicum* L.) Production through Improved Technology: An Overview of Production, Challenges, and Opportunities in Myanmar. **Sustainability**, [S. l.], v. 12, n. 9, p. 3515, jan. 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/9/3515>. Acesso em: 13 de mar 2024.

NETO, E. B.; BARRETO, L. P. **Análises Químicas e Bioquímicas em Plantas**. Recife: Editora Universitária da UFRPE, p. 261, 2011.

PATEL, J. S. *et al.* Chapter 18 - PGPR formulations and application in the management of pulse crop health. In: RAKSHIT, A. *et al.* (org.). **Biofertilizers**. [S. l.]: Woodhead Publishing, 2021. p. 239–251. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128216675000129>. Acesso em: 22 mar. 2024.

PATEL, P.; SAYYED, R. Z.; PATEL, H. PGPR: A Sustainable Agricultural Mitigator for Stressed Agro-Environments. In: MAWAR, R. *et al.* (org.). **Plant Growth Promoting Microorganisms of Arid Region**. Singapore: Springer Nature, 2023. p. 303–318. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-19-4124-5_14. Acesso em: 22 mar. 2024.

RAAIJMAKERS, J. M. *et al.* The rhizosphere: a playground and battlefield for soilborne pathogens and beneficial microorganisms. **Plant and Soil**, [S. l.], v. 321, n. 1, p. 341–361, 1

ago. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9568-6>. Acesso em: 27 abr. 2024.

RADHAKRISHNAN, R.; HASHEM, A.; ABD_ ALLAH, E. F. *Bacillus*: A Biological Tool for Crop Improvement through Bio-Molecular Changes in Adverse Environments. **Frontiers in Physiology**, [S. l.], v. 8, 6 set. 2017. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/physiology/articles/10.3389/fphys.2017.00667/full>. Acesso em: 27 abr. 2024.

RIBEIRO, V. P. *et al.* Co-inoculation with tropical strains of *Azospirillum* and *Bacillus* is more efficient than single inoculation for improving plant growth and nutrient uptake in maize. **Archives of Microbiology**, [S. l.], v. 204, n. 2, p. 143, 19 jan. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00203-022-02759-3>. Acesso em: 27 abr. 2024.

SANTOS, A. R. D. *et al.* Molecular and biochemical responses of sesame (*Sesame indicum* L.) to rhizobacteria inoculation under water deficit. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 14, 18 jan. 2024. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plantscience/articles/10.3389/fpls.2023.1324643/full>. Acesso em: 15 abr. 2024.

SANTOS, A. R. D. **Rizobactérias como estratégia de mitigação do estresse por déficit hídrico no gergelim BRS Morena**. 2022. 70 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - PPGCA) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2022.

SANTOS, F. L. D. *et al.* Inoculation and co-inoculation of growth promoting rhizobacteria in irrigated rice plants. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, [S. l.], v. 14, n. 3, p. 1–5, 30 set. 2019. Disponível em: <http://www.agraria.pro.br/ojs32/index.php/RBCA/article/view/v14i3a5665>. Acesso em: 27 abr. 2024.

SHAO, H.-B. *et al.* Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. **Comptes Rendus Biologies**, [S. l.], v. 331, n. 3, p. 215–225, 1 mar. 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631069108000048>. Acesso em: 27 abr. 2024.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. [S. l.]: Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, p. 627, 2009.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. [S. l.]: Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, p. 627, 2009.

SOARES, A. M. S.; MACHADO, O. L. T. Defesa de plantas: Sinalização química e espécies reativas de oxigênio. **Revista Trópica–Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 1, n. 1, p. 10, 2007.

STEEL, R. Analysis of variance I: The one-way classification. **Principles and procedures of statistics a biometrical approach**, p. 139-203, 1997.

STEIN, T. *et al.* Two Different Lantibiotic-Like Peptides Originate from the Ericin Gene Cluster of *Bacillus subtilis* A1/3. **Journal of Bacteriology**, [S. l.], v. 184, n. 6, p. 1703–1711,

15 mar. 2002. Disponível em: <https://journals.asm.org/doi/full/10.1128/jb.184.6.1703-1711.2002>. Acesso em: 22 mar. 2024.

SU, R. *et al.* Root diversity in sesame (*Sesamum indicum* L.): insights into the morphological, anatomical and gene expression profiles. **Planta**, [S. l.], v. 250, n. 5, p. 1461–1474, 1 nov. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00425-019-03242-y>. Acesso em: 13 de mar 2024.

TAIZ, L. *et al.* **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6ª edição. [S. l.]: Artmed, 2016.

TEKLU, D. H. *et al.* Analyses of genetic diversity and population structure of sesame (*Sesamum indicum* L.) germplasm collections through seed oil and fatty acid compositions and SSR markers. **Journal of Food Composition and Analysis**, [S. l.], v. 110, p. 104545, 1 jul. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0889157522001636>. Acesso em: 13 de mar 2024.

TSOTETSI, T. *et al.* Bacillus for Plant Growth Promotion and Stress Resilience: What Have We Learned? **Plants**, [S. l.], v. 11, n. 19, p. 2482, jan. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/11/19/2482>. Acesso em: 27 abr. 2024.

VINCENT, J.M. **A manual for the practical study of root-nodule bacteria**. IBP Handbook No. 15, Blackwell Science Publication, Oxford, 164p, 1970.

VURUKONDA, S. S. K. P. *et al.* Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth promoting rhizobacteria. **Microbiological Research**, [S. l.], v. 184, p. 13–24, 1 mar. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0944501315300380>. Acesso em: 28 abr. 2024.

WANG, W.; VINOCUR, B.; ALTMAN, A. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance. **Planta**, [S. l.], v. 218, n. 1, p. 1–14, 1 nov. 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00425-003-1105-5>. Acesso em: 15 abr. 2024.

WEI, P. *et al.* Sesame (*Sesamum indicum* L.): A Comprehensive Review of Nutritional Value, Phytochemical Composition, Health Benefits, Development of Food, and Industrial Applications. **Nutrients**, [S. l.], v. 14, n. 19, p. 4079, jan. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-6643/14/19/4079>. Acesso em: 13 de mar 2024.

WU, D. *et al.* Microbial interactions within beneficial consortia promote soil health. **Science of The Total Environment**, [S. l.], v. 900, p. 165801, 20 nov. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723044248>. Acesso em: 27 abr. 2024.

XU, G. *et al.* Morphological and physiological traits of rice roots and their relationships to yield and nitrogen utilization as influenced by irrigation regime and nitrogen rate. **Agricultural Water Management**, [S. l.], v. 203, p. 385–394, 30 abr. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377418301288>. Acesso em: 13 de mar 2024.

YADAV, R. *et al.* Current Research Trends and Prospects for Yield and Quality Improvement in Sesame, an Important Oilseed Crop. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 13, 6 maio 2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2022.863521/full>. Acesso em: 15 abr. 2024.

ZENAWI, G.; MIZAN, A. Effect of Nitrogen Fertilization on the Growth and Seed Yield of Sesame (*Sesamum indicum* L.). **International Journal of Agronomy**, [S. l.], v. 2019, p. e5027254, 24 jul. 2019. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/ija/2019/5027254/>. Acesso em: 28 abr. 2024.

ZHAO, X. *et al.* A meta-analysis on morphological, physiological and biochemical responses of plants with PGPR inoculation under drought stress. **Plant, Cell & Environment**, [S. l.], v. 46, n. 1, p. 199–214, 2023. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/pce.14466>. Acesso em: 22 mar. 2024.

ZHU, J.-K. Abiotic Stress Signaling and Responses in Plants. **Cell**, [S. l.], v. 167, n. 2, p. 313–324, 6 out. 2016. Disponível em: [https://www.cell.com/cell/abstract/S0092-8674\(16\)31080-7](https://www.cell.com/cell/abstract/S0092-8674(16)31080-7). Acesso em: 27 abr. 2024.