



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA



CAMPUS I – CAMPINA GRANDE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

CAMILA LIMA DO NASCIMENTO

**DESEMPENHO AGRONÔMICO DA CULTIVAR DE GERGELIM BRS PÉROLA
NEGRA INOCULADA COM BACIOS E SUBMETIDA À RESTRIÇÃO HÍDRICA**

CAMPINA GRANDE – PB

2023

CAMILA LIMA DO NASCIMENTO

**DESEMPENHO AGRONÔMICO DA CULTIVAR DE GERGELIM BRS PÉROLA
NEGRA INOCULADA COM BACIOS E SUBMETIDA À RESTRIÇÃO HÍDRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias da Universidade Estadual da Paraíba/Embrapa Algodão, como requisito obrigatório à obtenção de título de Mestre em Ciências Agrárias.

Área de Concentração: Agrobioenergia e agricultura familiar.

Orientadora: Profa. Dra. NAIR HELENA CASTRO ARRIEL
Coorientadora: Profa. Dra. LIZIANE MARIA DE LIMA

CAMPINA GRANDE – PB

2023

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.

N244d Nascimento, Camila Lima do.

Desempenho agrônomo da cultivar de gergelim BRS Pérola Negra inoculada com bacilos e submetida à restrição hídrica [manuscrito] / Camila Lima do Nascimento. - 2023.
54 p.

Digitado.

Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, 2023.

"Orientação : Profa. Dra. Nair Helena Castro Arriel, Embrapa Algodão."

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

1. Bacillus sp. 2. Sesamum indicum L. 3. Déficit hídrico. I.

Título

21. ed. CDD 631

CAMILA LIMA DO NASCIMENTO

**DESEMPENHO AGRONÔMICO DA CULTIVAR DE GERGELIM BRS PÉROLA
NEGRA INOCULADA COM BACILOS E SUBMETIDA À RESTRIÇÃO HÍDRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias da Universidade Estadual da Paraíba/Embrapa Algodão, como requisito obrigatório à obtenção de título de Mestre em ciências agrárias.

Área de Concentração: Agrobioenergia e agricultura familiar.

Aprovada em: 02 de maio de 2023.

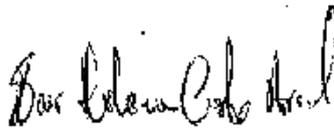
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. José Jaime Vasconcelos Cavalcanti (Examinador interno)
Embrapa algodão



Prof. Dr. Pedro Dantas Fernandes (Examinador Externo)
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)



Profa. Dra. Nair Helena Castro Arriel (Orientadora)
Embrapa algodão



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

AGRADECIMENTOS

Ao término deste trabalho e conclusão desta tão esperada pós-graduação, gostaria de agradecer as pessoas que estiveram comigo, lado a lado, nessa conquista.

Primeiramente a Deus, Pai celestial, aquele que é onipotente, onisciente e onipresente, dona da minha vida, que me dá sabedoria, graça e paz.

Aos meus pais que sempre me apoiaram, me ensinaram sobre caráter, amor, respeito, compaixão e gratidão.

Ao meu esposo, Danúbio Leonardo, meu parceiro de todas as horas o meu maior incentivador, que me ensina diariamente o verdadeiro significado de companheirismo.

Aos meus amigos da vida, os quais sempre me incentivam, torcem e vibram a cada conquista minha.

As minhas companheiras de jornada, Andreza Gabriela e Maria Clara que estiveram comigo em todas as etapas dessa missão, me dando apoio não só técnico, mais principalmente emocional, quando o desânimo e as incertezas tomavam conta de mim elas estavam sempre ali me fazendo entender que tudo iria dar certo. A Anderson que esteve sempre disponível a me ajudar, mesmo estando longe.

A Geise, especialmente, Teresinha, Fábria e Dr. Tarcísio Gondim, por toda ajuda no andamento do trabalho, sempre dispostos e pacientes a me ensinar, foram pessoas que me fizeram aprender muito e me ajudaram a evoluir quanto pesquisadora.

À minha orientadora, Dra. Nair Helena Castro Arriel, pelas chances dadas a mim, por permitir, através de seus ensinamentos, o meu crescimento, aprofundamento na área de melhoramento genético vegetal, pelos questionamentos que me fizeram pensar, buscar mais e evoluir com eles, pela disponibilidade, que mesmo diante de inúmeras demandas a cumprir estava sempre disponível a me atender.

A minha coorientadora, Dra. Liziane Maria de Lima, pelos cuidados pessoalmente falando, pelos ensinamentos e orientações baseado sempre no profissionalismo, no respeito e atenção. Pela disponibilidade e preocupação com tudo que acontecia. Por ter me recebido de braços abertos, disposta a sempre me ajudar no que eu precisasse. Por me permitir passar por experiências profissionais que jamais esquecerei e que fará diferença na minha vida acadêmica.

À EMBRAPA algodão, pelo acesso a profissionais qualificados e responsáveis e por toda infraestrutura oferecida para o desenvolvimento desta pesquisa científica.

A UEPB pelo incentivo através do programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias formando pesquisadores capacitados para desenvolver trabalhos que venham beneficia a comunidade.

Ao secretário da pós-graduação, Danilo, que sempre esteve disponível a resolver os trâmites administrativos.

E por fim, mais não menos importante, a CAPES, pois o presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.

RESUMO

O gergelim (*Sesamum indicum* L.) é uma oleaginosa cultivada em mais de 70 países, no Brasil, a sua exploração vem crescendo nos últimos anos. É uma cultura com ampla adaptabilidade às condições edafoclimáticas de clima quente, no entanto, pode sofrer com efeitos causados pela escassez de água. O déficit hídrico pode afetar o metabolismo das plantas provocando, dentre outros fatores, inibição de fotossíntese e diminuição na absorção de nutrientes, desfavorecendo o crescimento e desenvolvimento das plantas. Assim, a utilização de inoculantes à base de bactérias promotoras de crescimento de plantas pode ser uma boa estratégia de manejo. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho da cultivar de gergelim BRS Pérola Negra, inoculada com bacilos e submetida à restrição hídrica. O experimento foi conduzido em campo, delineamento experimental em blocos casualizados, sendo 3 (inoculantes) x 2 (níveis de nitrogênio químico) x 2 (regimes hídricos), com três repetições totalizando 36 tratamentos. Após 35 dias da emergência a irrigação foi suspensa por seis dias e, no sexto dia, foram coletadas folhas para análises bioquímicas. Ao final do ciclo da cultura foram coletadas as seguintes variáveis: altura de inserção do primeiro fruto; altura de planta; comprimento de raiz; massa da raiz seca; massa da parte aérea seca; número de cápsula; contagem do número de cápsulas abertas; comprimento e diâmetro de cápsula; peso de 1000 sementes; peso total de sementes; teor de nitrogênio e fósforo. Os dados coletados foram submetidos à análise de variância ($p \leq 0,05$) e as médias comparadas pelo teste F ($p \leq 0,05$) utilizando o programa estatístico SISVAR versão 5.6. O GraphPad versão 9.5, foi utilizado para gerar os gráficos e o Genes para análises de correlação entre caracteres agronômicos e bioquímicos. De acordo com os resultados, houve efeito positivo da inoculação em todas as variáveis agronômicas, principalmente nas plantas sob condição de restrição hídrica. A produção final de grãos teve um incremento de 15,45% no tratamento inoculado com ESA 402 sob estresse hídrico e, 151,43% no tratamento inoculado com pant001 na condição irrigada, em comparação com o tratamento sem nitrogênio. As análises bioquímicas mostraram que houve um aumento nas atividades enzimáticas de superóxido dismutase (SOD), ascorbato peroxidase (APX) e concentração de pigmentos fotossintetizantes nos tratamentos inoculados. Os resultados obtidos de nitrogênio e fósforo em folhas foram positivos, visto que aumentaram seus teores na condição de estresse, nos tratamentos com nitrogênio e inoculados. Quanto as correlações, os caracteres que se correlacionaram significativamente, com associações altas e positivas, foram o número de cápsulas X número de cápsulas abertas (r_{fe} 0,94) e clorofila a X clorofila total ($a+b$) (r_{fe} 0,94) e negativa entre os caracteres comprimento de cápsulas X número de cápsulas (r_{fe} 0,79). Com base nesses dados constatou-se que os inoculantes contribuíram para o crescimento e o desenvolvimento das plantas de gergelim da cultivar BRS Pérola Negra em condições de restrição hídrica.

PALAVRAS-CHAVE: *Bacillus* sp., *Sesamum indicum* L., déficit hídrico.

ABSTRACT

Sesame (*Sesamum indicum* L.) is an oleaginous plant cultivated in more than 70 countries, in Brazil, its exploitation has been growing in recent years. It is a crop with wide adaptability to edaphoclimatic conditions of hot weather, however, it can suffer from effects caused by water scarcity. Water deficit can affect plant metabolism, causing, among other factors, inhibition of photosynthesis and a decrease in nutrient absorption, disfavoring plant growth and development. Thus, the use of inoculants based on plant growth-promoting bacteria can be a good management strategy. In this context, this work aims to evaluate the performance of the sesame cultivar BRS Pérola Negra, inoculated with bacilli and subjected to water restriction. The experiment was carried out in the field, experimental design in randomized blocks, being 3 (inoculants) x 2 (chemical nitrogen levels) x 2 (water regimes), with 3 repetitions, totaling 36 treatments. After 35 days of emergence, irrigation was suspended for six days and, on the sixth day, leaves were collected for biochemical analysis. At the end of the crop cycle, the following variables were collected: insertion height of the first fruit; plant height; root length; dry root mass; dry shoot mass; capsule number; counting the number of open capsules; capsule length and diameter; weight of 1000 seeds; total seed weight; nitrogen and phosphorus content. The collected data were submitted to analysis of variance ($p \leq 0.05$) and the means compared by the F test ($p \leq 0.05$) using the statistical program SISVAR version 5.6. GraphPad version 9.5 was used to generate graphs and Genes for correlation analysis between agronomic and biochemical traits. According to the results, it was possible to observe a positive effects of inoculation in all agronomic variables, mainly in plants under conditions of water restriction. The final grain production had an increase of 15.45% in the treatment inoculated with ESA 402 under water stress, and 151.43% in the treatment inoculated with pant001 in the irrigated condition, in comparison with the treatment without nitrogen. The biochemical analyzes showed that there was an increase in the enzymatic activities of superoxide dismutase (SOD), ascorbate peroxidase (APX) and concentration of photosynthetic pigments in the inoculated treatments. The results obtained for nitrogen and phosphorus in leaves were positive, since their levels increased in the stress condition, in the treatments with nitrogen and inoculated. As for the correlations, the characters that correlated significantly, with high and positive associations, were the number of capsules X number of open capsules (rfe 0.94) and chlorophyll to X total chlorophyll ($a+b$) (rfe 0.94) and negative between the characters length of capsules X number of capsules (rfe 0.79). Based on these data, it was found that the inoculants for the BRS Pérola Negra sesame plants contributed to their better growth and development even under conditions of water restriction.

KEYWORDS: *Bacillus* sp., *Sesamum indicum* L., water deficit.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1.** Aplicação de nitrogênio químico para os tratamentos nitrogenados 21 dias após a emergência.....22
- Figura 2.** Reagentes após a pesagem para o preparo do meio sólido (A), mistura pronta para homogeneização em agitador (B), meio sólido e placas prontas para estriar as estirpes (C) e placas já estriadas prontas para incubação (D).23
- Figura 3.** Sementes durante (A) a imersa em etanol a 70%, após imersão e lavagem em água destilada (B) e inoculadas prontas para o plantio (C).....24
- Figura 4.** Variáveis agronômicas: altura de inserção do primeiro fruto (AIF) (A), altura de planta (ALTP) (B), massa da raiz seca (MRS) (C) comprimento de raiz (CR) (D) e massa da parte aérea seca (MPAS) (E) em gergelim BRS Pérola Negra inoculada com cepas de *Bacillus* (pant001, M143 e ESA 402) e submetido a restrição hídrica.31
- Figura 5.** Número de cápsulas (NC) (A), número de cápsulas abertas (NCA) (B), comprimento (CC) (C) e diâmetro (DC) de cápsula (D) em gergelim BRS Pérola Negra inoculada com cepas de *Bacillus* (pant001, M143 e ESA 402) e submetido à restrição hídrica.....34
- Figura 6.** Peso de 1000 sementes (P1000) (A) e peso total de sementes (PTS) (B) em gergelim BRS Pérola negra inoculada com cepas de *Bacillus* (pant001, M143 e ESA 402) e submetido a restrição hídrica.36
- Figura 7.** Atividade de superóxido dismutase (SOD) e ascorbato peroxidase (APX) em gergelim BRS Pérola Negra inoculada com cepas de *Bacillus* (pant001, M143 e ESA 402) e submetido a restrição hídrica.38
- Figura 8.** Pigmentos fotossintetizantes clorofila a, b, total e carotenoides em gergelim BRS Pérola Negra inoculada com cepas de *Bacillus* (pant001, M143 e ESA 402) e submetido a restrição hídrica.40
- Figura 9.** Nitrogênio e fósforo em gergelim BRS Pérola Negra inoculada com cepas de *Bacillus* (pant001, M143 e ESA 402) e submetido a restrição hídrica.....42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Análise dos componentes físico-químicos do solo.	21
Tabela 2. Resumo de análise de variância para variáveis altura da inserção do primeiro fruto (AIF) (cm), altura da planta (ALTP) (m), massa da raiz seca (MRS) (g), comprimento da raiz (CR) (cm) massa total da parte aérea seca (MPAS) (g).	28
Tabela 3. Resumo da análise de variância das variáveis número de cápsulas (NC), número de cápsulas abertas (NCA), comprimento (CC) e diâmetro (DC) de cápsula (mm).	32
Tabela 4. Resumo do quadrado para variáveis massa de 1000 sementes (P1000) e massa total de sementes (PTS).	35
Tabela 5. Resumo do quadrado para atividade superóxido dismutase (SOD) e ascorbato de peroxidase (APX).	37
Tabela 6. Resumo do quadrado para pigmentos fotossintetizantes clorofila a, b, total e carotenoides.	38
Tabela 7. Estimativa de correlação fenotípica entre caracteres agrônômicos e bioquímicos em gergelim BRS Pérola Negra inoculada com cepas de <i>Bacillus</i> (pant001, M143 e ESA 402) e submetido à restrição hídrica.	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivo geral	11
1.1.1	<i>Objetivos Específicos.....</i>	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	Importância econômica do gergelim	12
2.2	Aspectos gerais do gergelim	13
2.3	Efeito do déficit hídrico nas plantas	14
2.4	Bactérias promotoras de crescimento de plantas como atenuadoras de estresse hídrico.....	16
2.4.1	<i>Bacillus subtilis.....</i>	16
2.5	Correlação entre caracteres agronômicos e fisiológicos do gergelim	18
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1	Implantação, condução e coleta experimental.....	21
3.2	Preparo dos inoculantes.....	22
3.3	Desinfestação e inoculação das sementes	23
3.4	Manejo em campo	24
3.5	Avaliações agronômicas	25
3.6	Análise de nitrogênio.....	25
3.7	Análise de fósforo	26
3.8	Atividades enzimáticas.....	26
3.9	Pigmentos Fotossintetizantes.....	27
3.10	Análises estatísticas	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1	Variáveis agronômicas.....	28
4.2	Variáveis bioquímicas.....	36
4.2.1	<i>Atividade superóxido dismutase (SOD) e ascorbato peroxidase (APX).....</i>	36
4.3	Pigmentos fotossintetizantes.....	38
4.4	Análise de nitrogênio e fósforo	40
4.5	Estimativa de correlação entre caracteres agronômicos e fisiológico	42
5	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

O gergelim (*Sesamum indicum* L.) é uma espécie de origem africana, considerada a oleaginosa mais antiga cultivada pela humanidade e sua exploração acontece em diversos países, dentre eles o Brasil. O seu principal produto é o grão, os quais apresentam óleo de excelente qualidade, podendo ser usado na produção de alimentos, na área farmacêutica e industrial. A espécie é de fácil cultivo e, por este motivo, nos últimos anos tem se destacado como excelente alternativa agrícola, principalmente para regiões do Nordeste brasileiro, por oferecer condições edafoclimáticas favoráveis para sua exploração (QUEIROGA et al., 2008; ARRIEL et al., 2009; FERREIRA & SPRICIGO, 2017).

Apesar do gergelim apresentar boa adaptabilidade a condições edafoclimáticas de clima quente a cultura requer algumas condições favoráveis para seu melhor desenvolvimento, como temperaturas entre 25 e 30°C, solos franco-arenoso e franco-argilosos; é exigente em adubação, sendo nitrogênio, fósforo e potássio, os três principais nutrientes exigidos pela planta. A cultura, requer pluviosidade entre 500 e 650 mm por ano (ARRIEL et al., 2007). Contudo, a escassez hídrica tem sido um dos principais problemas para produção agrícola, inclusive para o gergelim, a depender do grau e tempo de exposição ao estresse. Logo, a redução hídrica pode desencadear inúmeros problemas que podem afetar o desenvolvimento e produção das plantas, como diminuição na absorção de nutrientes, inibição fotossintética e produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) (CAMPOS et al., 2021).

Em busca de estratégias que diminuam os danos causados pela restrição hídrica e auxiliem no melhor desempenho do gergelim, o uso de bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCP), dentre elas as do gênero *Bacillus*, têm recebido atenção dos programas de melhoramento genético. As BPCPs podem contribuir para amenizar o estresse hídrico por meio de diversos mecanismos, com destaque, dentre eles, a produção de fito-hormônios (auxina, giberilina e citocininas), aumento na disponibilidade de nutrientes para as plantas, solubilização de nutrientes e produção de enzimas antioxidantes (KANJANASOPA et al., 2021; GOMES et al., 2022).

Portanto, o uso de inoculantes formulados com bactérias promotoras de crescimento vegetal no gergelim BRS Pérola Negra pode ser uma escolha promissora que poderá atuar positivamente nos aspectos fisiológicos, bioquímicos e agrônômicos, favorecendo seu melhor crescimento e desenvolvimento.

1.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho da cultivar de gergelim BRS Pérola Negra inoculada com bacilos e submetida à restrição hídrica, a fim de selecionar qual inoculante tem maior eficiência.

1.1.1 *Objetivos Específicos*

- Analisar variáveis agronômicas na cultivar de gergelim BRS Pérola Negra, inoculada com bacilos e submetida à restrição hídrica;
- Avaliar a atividade de enzimas antioxidantes APX e SOD na cultivar de gergelim BRS Pérola Negra, inoculada com bacilos e submetida à restrição hídrica;
- Quantificar o teor de nitrogênio e fósforo na cultivar de gergelim BRS Pérola Negra, inoculada com bacilos e submetida à restrição hídrica;
- Estimar parâmetros genéticos de correlação entre caracteres agronômicos e bioquímicos;
- Identificar o inoculante mais responsivo para a planta submetida à condição de restrição hídrica.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Importância econômica do gergelim

Originário do continente africano, o gergelim (*Sesamum indicum* L.), atualmente encontra-se na nona posição das principais oleaginosas mais cultivadas no mundo. Seu cultivo data de pelo menos 4.300 anos a.C., sendo considerada a mais antiga oleaginosa explorada pela humanidade (ARRIEL et al., 2009; ALBUQUERQUE et al., 2011; ZOUMPOULAKIS et al., 2012; KHELIFA et al., 2019, FAOSTAT, 2023).

Nos últimos 20 anos a produção mundial de gergelim passou de 7,72 para 14,24 hectares plantados (FAOSTAT, 2023). O cultivo do gergelim acontece em mais de 70 países, sendo de maneira mais concentrada na República Centro-Africana; Afeganistão; Bangladesh; Burquina Faso; Camboja; Camarões; Índia; Sudão e China (FAOSTAT, 2023).

No Brasil, a produção do gergelim vem crescendo bastante. Entre os anos de 2015 e 2019 a produção total de gergelim passou de 20 mil toneladas para 120 mil toneladas (FAO, 2021). Na safra de 2018/2019 a área plantada era de 53 mil hectares e passou para 175 mil hectares na safra de 2020, isso corresponde a um aumento de 230% em apenas um ano. Nesse período, o rendimento médio da cultura passou de 41,3 mil para 95,8 mil toneladas de grãos (CONAB, 2023).

As regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste são responsáveis pela produção de gergelim no Brasil, sendo os estados de São Paulo, Goiás, Mato Grosso, Ceará, Rio Grande do Norte, Bahia, Piauí e Minas Gerais os principais produtores. Os dados do último censo agropecuário brasileiro mostram que, dentre os estados brasileiros, o Mato Grosso, especificamente os municípios de Canarana e Água boa destacam-se como maior produtor de gergelim, com cerca de 40 mil toneladas de grãos, em uma área de quase 100 mil hectares cultivados (IBGE, 2020; CONAB, 2023).

No Nordeste, o cultivo de gergelim ainda é inferior à expectativa, se comparado com outras culturas como amendoim. Entretanto, principalmente nas regiões semiáridas onde um dos maiores problemas da produção agrícola é a escassez de recursos hídricos, a produção do gergelim vem sendo uma excelente alternativa de grande importância econômica para pequenos agricultores, por ser uma espécie que apresenta ampla adaptabilidade as condições edafoclimáticas de clima quente (BELTRÃO et al., 2013).

O gergelim apresenta inúmeras possibilidades de exploração e vem sendo utilizada para alimentação humana e animal, uso medicinal e para extração de óleo. Suas sementes apresentam

elevado teor de óleo (46% a 56%) com alta qualidade nutricional, devido à presença de ácidos graxos insaturados, como oleico e linoleico, podendo atender as demandas das indústrias oleoquímicas (PERIN et al., 2010; PATHAK et al., 2014).

No geral, a produção de gergelim da região nordeste tem sido destinada para a fabricação de doces, temperos e pães. Na região Centro Oeste, grande parte do que é produzido vai para o abastecimento das indústrias e para os mercados de produtos naturais, especialmente em São Paulo, Curitiba e Rio de Janeiro, e para exportação para Israel, Japão e Paraguai (OLIVEIRA & ARRIEL, 2019; LIMA et al., 2021; BOTELHO, 2022).

2.2 Aspectos gerais do gergelim

O gergelim pertence à família Pedaliaceae, gênero *Sesamum* e espécie *Sesamum indicum* L., existe outra denominação científica para a espécie *S. indicum* conhecida como *sesamum orientale*. Sabe-se que o gergelim possui 16 gêneros e 60 espécies e, ainda, três subespécies, sendo elas a *S. indicum subindivisum*, *S. indicum subdentatum* e *S. indicum grandidentatum*. (ARRIEL et al., 2009; MAGALHAES et al., 2010).

É uma espécie oleaginosa anual, herbácea que possui caule ereto, com ou sem ramificação, que pode medir de 50 cm a 3 m de altura e tem sistema radicular pivotante. A planta adulta apresenta folhas alternadas ou opostas, de formato lobado ou dentado na parte inferior e lanceoladas na parte superior (BELTRÃO & VIEIRA, 2001; ARRIEL 2007).

É uma planta predominantemente autógama, ou seja, possui flores hermafroditas, a reprodução se dá por autofecundação. Suas flores são completas e axilares, variando de 1 a 3 por axila. O fruto possui formato de cápsula alongada, dependendo da variedade pode ser deiscente (abrem naturalmente quando maduro e liberam as sementes) ou indeiscente (não abrem quando maduro). Os grãos têm elevado teor de proteínas, carboidratos totais e fibras, além de outros componentes que são fontes importantes para alimentação como vitamina A, ferro, cálcio e fósforo (BELTRÃO, 2009; QUEIROGA et al. 2017; CRUZ et al.; 2019).

Uma das principais características do gergelim é a ampla adaptabilidade a condições edafoclimáticas de clima quente e tolerância a seca, contudo, alguns fatores são determinantes para seu melhor crescimento e desenvolvimento (MAGALHES et al., 2010). Esta oleaginosa se desenvolve melhor em condições tropicais e subtropicais, prefere temperaturas entre 25 °C e 30 °C, pois favorecem o crescimento vegetativo e maturação dos frutos. Requer, nos primeiros 30 dias após a germinação (DAE), 180 a 160 mm de água e o acúmulo superior a 250 mm até o final dos primeiros 60 dias após o plantio (LIMA et al., 2009).

Para seu cultivo é mais indicado solos mais leves, desde franco-arenoso a franco-argilosos, ricos em matéria orgânica e bem drenados, com o pH neutralizado, entre 5,7 até 7,0, não tolera acidez elevada e nem a alcalinidade excessiva (GRILO JÚNIOR & AZEVEDO, 2013). Indispensavelmente, devem estar presentes no solo nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio, por serem os nutrientes mais requisitados pelo gergelim. A falta desses três importantes nutrientes, pode ocasionar a redução do crescimento e da produtividade do gergelim, diminuição da frutificação e da produção de sementes (LIMA & BELTRÃO, 2009).

O gergelim pode ser cultivado em sistemas convencionais, orgânicos, agroecológicos e tradicionais, podendo ser cultivado consorciado e em rotação, contudo, o seu desempenho depende de tratamentos culturais como o preparo do solo, incluindo aração e gradagem, controle de pragas e doenças, controle de plantas invasoras, colheita e beneficiamento, dentre outras técnicas (FIRMINO et al., 2009; CRUZ et al., 2019).

Quanto a colheita do gergelim, o ideal é que ocorra no momento da maturação fisiológica, ou seja, a partir do amadurecimento de flores e ramos e no início da abertura das cápsulas, para evitar a perda de grãos, uma vez que a colheita é feita após esse período, as cápsulas podem se abrir rapidamente e perder suas sementes (ANTONIASSI et al., 2013).

2.3 Efeito do déficit hídrico nas plantas

A água é o componente mais importante para as plantas, visto que constitui cerca de 95% da biomassa verde, atua como solvente e também como reagente em diversos processos químicos e transportador (TAIZ & ZEIGER, 2013). A água é essencial em processos como o fotossintético, por exemplo, responsável por regular a abertura e o fechamento estomático, possibilitando absorção de CO₂ e mobilizando foto - assimilados para as plantas (CHAVARRIA & SANTOS, 2012).

Ao mesmo tempo que a água é considerada um recurso indispensável para as culturas é também um fator limitante para a produção agrícola, pois sua redução pode causar danos irreparáveis nas plantas. A baixa disponibilidade de água nas plantas pode desestabilizar condições fisiológicas (transpiração, absorção e fotossíntese), afetar o seu crescimento e desenvolvimento e, conseqüentemente, promover a baixa produtividade das culturas (PES & ARENHARDT, 2015; MONTILLET et al., 2021;).

O estresse hídrico pode causar a desidratação celular, nesse caso, pode ocorrer a perda de turgor, o fechamento estomático e, por consequência, a limitação do fluxo normal das trocas gasosas, fotossíntese e absorção dos nutrientes. Esses efeitos podem reduzir a área foliar e a

aceleração da senescência das folhas (PIMENTEL, 2004; TAIZ et al., 2017; JÚNIOR et al., 2019).

Outra implicação desencadeada pelo déficit hídrico é o aumento da produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), que causam o estresse oxidativo, o qual inibe a síntese de proteínas, oxidam os pigmentos fotossintéticos e causam a peroxidação de lipídeos de membrana (SHARMA et al. 2012; PORTO, 2022).

As plantas submetidas ao estresse por deficiência hídrica tendem a manifestar diferentes mecanismos de defesa, amplos e complexos. Esses mecanismos incluem a prevenção e a tolerância à desidratação celular, através do ajuste osmótico, caracterizado pelo acúmulo de osmoprotetores e antioxidantes (FLORES et al., 2020). O acúmulo de compostos antioxidantes, como ascorbato e tocoferol em conjunto com as enzimas antioxidantes superoxidase dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX), são capazes de desintoxicar espécies reativas de oxigênio, geradas pelo estresse abiótico (seca, salinidade etc.) e promover a defesa da célula vegetal (GRATÃO et al., 2005; YOUSEFZADEH-NAJAFABADI e EHSANZADEH, 2017).

Em plantas como o gergelim, que apresenta alta resistência estomática, isso faz com que transpire menos em períodos críticos e tolere a escassez de água, as respostas ao déficit hídrico vai depender da intensidade do estresse, do estado fenológico da planta e das condições do ambiente (BELTRÃO et al., 2009).

Estudos realizados para avaliar a taxa fotossintética (intensidade de fotossíntese que a planta realiza) das culturas de amendoim, gergelim e mamona, mostraram uma grande redução na taxa fotossintética, independente de cultivar e do horário do estresse, por consequência de distúrbios no mecanismo da abertura dos estômatos causado pelo déficit hídrico (PINTO, 2006; BELTRÃO, 2013).

Presentemente, algumas instituições que possuem programas de melhoramento genético, como a Embrapa, por exemplo, que atua desde 1986 no melhoramento genético da cultura do gergelim, vem trabalhando para disponibilizar material genético mais adaptado aos estresses abióticos (seca, salinidade etc.) e com melhor desempenho produtivo para aumentar a sua exploração, principalmente em regiões semiáridas do nordeste brasileiro (BOTELHO et al., 2022).

Algumas cultivares mais adaptadas às condições edafoclimáticas já foram desenvolvidas. O Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), desenvolveu as cultivares IAC-Ouro (1983), IAC China (1993) e IAC Guatemala (1995) e a Embrapa Algodão desenvolveu as cultivares Seridó 1 (1988), CNPA G2 (1988), CNPA G3 (1989), BRS 196 (CNPA G4)

(2000), BRS Seda (2007) BRS Anahí (2017) e a BRS Morena (2020) (ARRIEL et al., 2009; EMBRAPA, 2019) para atender a demanda do mercado.

2.4 Bactérias promotoras de crescimento de plantas como atenuadoras de estresse hídrico

São muitos os microrganismos que habitam e interagem com as plantas, dentre eles destacam-se as bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCPs) ou rizobactérias promotoras de crescimento de plantas (RPCP), que podem ser encontradas na superfície ou no interior das plantas, não causam, aparentemente, danos aos seus hospedeiros e podem conferir benefícios vantajosos as plantas (GAIEIRO, 2013; MILANI, 2017; MELO, 2021).

Existem inúmeros microrganismos relatados como BPCP, os mais utilizados em pesquisas de melhoramento genético são dos gêneros: *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Enterobacter*, *Serratia*, *Klebsiella*, *Burkholderia*, *Azospirillum*, *Gluconacetobacter*, *Azoarcus*, *Arthrobacter* e *Paenibacillus* (Lanna et al., 2021).

Atualmente, as BPCPs vêm sendo usadas na formulação de inoculantes para tratamentos de sementes, explantes e pulverização, por serem bactérias promissoras no tratamento de plantas submetidas a estresses abióticos (seca, salinidade, temperatura, etc.), melhorando o desempenho e, conseqüentemente, aumentando a produtividade das culturas (MARIANO et al., 2004; LIMA et al., 2019; PANIGRAHI et al., 2019).

2.4.1 *Bacillus subtilis*

O *B. subtilis* é caracterizado como uma bactéria Gram-positiva, não patogênica extensivamente utilizada na produção de enzimas extracelulares (amilase, lipase, celulase, proteases, oxidase, catalase, etc.), a principal função dessas enzimas é possibilitar a entrada de nutrientes nas células vegetais. O *B. subtilis* também se destaca por produzir esporos altamente resistentes a altas e baixas temperaturas e em ambientes com baixa disponibilidade de nutrientes (BUENO et al., 2006; ALVES et al., 2018; COURI & DAMASO, 2021).

Podem atuar no crescimento e desempenho das culturas por meio de diversos mecanismos (diretos ou indiretos) como a produção de fito - hormônios (auxina, giberelina, citocinina e etileno); principais grupos de hormônios responsáveis por estimular o alongamento celular (crescimento em altura), enraizamento, quebra de dormência, crescimento,

amadurecimento dos frutos, dentre outros (CASTRO & CARVALHO, 2014; PAULILO et al., 2015; KUMAR & VERMA, 2018).

Outros efeitos diretos positivos do *B. subtilis* são: maior absorção de nutrientes, como nitrogênio (N), solubilização de nutrientes como fósforo (P), além de inibir a competição por minerais e locais de colonização e, ainda, podem ser utilizados no controle biológico de microrganismos fitopatógenos (CASSÁN et al., 2014; PÉREZ MONTAÑO et al.; 2014; TURATTO et al., 2018).

Quanto aos efeitos benéficos das BPCPs a fixação biológica de nitrogênio (FBN) destaca-se como o principal deles. O nitrogênio é um dos principais macronutrientes requeridos pelas plantas, desempenha um papel crucial na produção de proteínas, ácidos nucleicos, hormônios e clorofila, sua fixação depende da conversão para nitrato que se dá por meio da ação dos microrganismos (PAULILO et al., 2015; BARROS, 2020). A maioria das BPCPs fixadoras de nitrogênio são dos gêneros *Rhizobium* e *Bradyrhizobium*. Embora ainda seja escasso, trabalhos com *B. subtilis* vêm sendo desenvolvidos para comprovar o acúmulo de nitrogênio nas plantas. Em seu estudo com duas linhagens de *B. subtilis* em milho e sorgo, Aquino et al. (2019) averiguaram um aumento no acúmulo de N no milho, no sorgo os valores de acúmulo de N não foram significativos.

Outra ação benéfica do uso de *B. subtilis* que se destaca é a solubilização de nutrientes como o fósforo (P). Embora o P seja um macronutriente extremamente importante para garantir o bom desempenho e crescimento das plantas, sendo este fundamental para a síntese de ATP (adenosina trifosfato), principal fonte de energia das células vegetais, usada em diversas funções, tais como transporte de assimilados, armazenamento e transferência de energia, divisão celular, crescimento celular e a transferência de informações genéticas, a sua disponibilidade para as plantas é baixa, devido sua rápida imobilização (PAULILO et al., 2015; BARROS, 2020; HANSEL et al., 2021).

É importante destacar que o P se encontra nos solos, basicamente de duas formas: orgânica (Po) considerada insolúvel e inorgânicas (Pi) chamada de solúvel. O Pi é menos eficiente, devido a sua rápida imobilização no solo, já o Po passa mais tempo para se dissolver no solo e tende a aumentar a disponibilização para as plantas (BARRETO, 2007; SOUZA et al., 2007; KHOSA et al., 2021).

O *B. subtilis* tem capacidade de converter o fósforo insolúvel no solo, por meio do processo de solubilização e, então disponibilizá-lo para as plantas (GARCIA et al. 2015; KOUR et al. 2021).

Carvalho et al. (2023) estudando a eficácia de *B. subtilis* como promotor de crescimento vegetal em soja, constaram incremento no peso de 100 grãos, comprimento da raiz, biomassa, número de vargem, maior eficiência no aproveitamento de P (fósforo) e maior acúmulo de N (nitrogênio) em diferentes cultivares inoculadas com diferentes doses do inoculante.

Ainda sobre os efeitos positivos dos *B. subtilis* também é importante destacar a produção de fitohormônios, dentre eles o ácido indolacético (AIA) e ácido abscísico (ABA). AIA e ABA, tem forte influência no desenvolvimento das plantas, são responsáveis pela diferenciação dos tecidos vasculares, divisão celular, crescimento de brotos laterais, indução de síntese de proteínas em sementes, além de serem atenuantes aos efeitos de estresse hídrico (PORCEL et al., 2014; GOSWAMI et al., 2015; COHEN et al., 2015).

Júnior et al. (2022), estudando 7 isolados de *B. subtilis* como promotor de crescimento vegetal em soja, constataram que todos os isolados foram capazes de produzir AIA e se mostraram eficientes na produção de biomassa da parte aérea e radicular.

Diante do exposto, pode-se dizer que o uso de *B. subtilis* apresenta grande potencial para a produção agrícola, visto que está envolvido em diversos mecanismos que favorecem o crescimento e desenvolvimento das culturas.

2.5 Correlação entre caracteres agrônômicos e fisiológicos do gergelim

Atualmente os programas de melhoramento genético vêm buscando selecionar genótipos que apresentem maior adaptabilidade às condições ambientais adversas, rentabilidade de grãos e dentre outros aspectos que sejam importantes para aumentar a produção agrícola. No entanto, as características de desempenho produtivo de uma determinada espécie são bastante complexas e requer a determinação de estimativas de parâmetros genéticos para observar a variabilidade genética de população de plantas (LEITE et al., 2015).

O sucesso no melhoramento de uma espécie depende da magnitude da variabilidade disponível e herdável. A determinação da magnitude dessa variabilidade é de extrema importância, pois proporciona maior eficiência no processo de seleção de genótipos em função de características de interesse. A variabilidade observada pode ser devido ao fenótipo ou fatores genotípicos ou combinação de ambos. O componente genotípico sendo hereditário é a base para a seleção. O processo de seleção de genótipos pode ser executado de forma direta ou indireta. A seleção direta é baseada em estimativa experimental de rendimento, enquanto a seleção indireta é baseada em informações sobre um caráter secundário relacionado, que apresente uma correlação genética razoavelmente alta com o rendimento. Assim, entender a associação que

existe entre as diferentes características de uma planta e seu rendimento é essencial no direcionamento da estratégia de seleção. Essa determinação envolve conhecer as correlações genéticas existentes entre os caracteres de interesse (MEKURIAW, 2008; KOUIGHAT et al., 2022).

As condições ambientes em que as plantas se desenvolvem afetam seus caracteres (VENCOVSKY & BARRIGA 1992; BIZARI et al., 2017). Desta forma, a correlação com o ambiente acontece quando essas características são influenciadas pelas condições ambientais adversas. A correlação mostra o efeito geral das variáveis ambientais, que pode ser positivo ou negativo, dependendo do caractere em questão (FALCONER, 1987; RAMALHO et al., 2012).

Taiz et al. (2017) afirmam que as plantas são capazes de ajustar suas atividades fisiológicas mesmo em condições não ideais de cultivo, a fim de minimizar as perdas e maximizar o desenvolvimento e a produção. As culturas com comportamento semelhante em termos de exigência climática, período de plantio e características fenotípicas podem apresentar variações em seu desenvolvimento devido às condições ambientais adversas (ALMEIDA et al., 2018).

Haibru et al. (2018), avaliaram 45 genótipos de gergelim para estudar a correlação baseada no rendimento e seus componentes, incluindo características relacionadas à deiscência da cápsula e observaram diferenças altamente significativas entre os genótipos com relação a todos os caracteres indicando ampla variabilidade, sendo que a produção de sementes apresentou correlação significativa alta e positiva com número de cápsulas por planta e altura da planta.

Pandey et al. (2019), ao avaliarem características associadas à tolerância a seca de 76 genótipos de gergelim (*S. indicum* L), observaram que os genótipos em condição irrigada e não irrigada tiveram variação e correlação notável entre a maioria das características morfológicas como altura de planta, peso seco das folhas, número de ramos, medidor de clorofila e temperatura do dossel. Ao avaliarem a variabilidade induzida e observada em linhagens mutantes de gergelim altamente produtivos, Kouighat et al., 2022 observaram linhagens mutagênicas com o maior número de cápsulas por planta e rendimento de sementes.

A correlação entre dois ou mais caracteres pode ser medida por um coeficiente de correlação, como o coeficiente de correlação de Pearson (r), que varia de -1 a 1 e mede a força e a direção da relação entre as variáveis. A existência de uma forte relação entre dois ou mais caracteres permite a seleção de uma característica e, ao mesmo tempo, obter melhorias na outra característica correlacionada. No entanto, é importante lembrar que a correlação entre características pode variar em diferentes populações e ambientes, e que outras estratégias de

seleção podem ser necessárias para atingir um conjunto específico de características desejadas (CASTRO et al., 2019).

Nesse contexto, entender a associação que existe entre as diferentes características de uma planta e seu rendimento é essencial no direcionamento da estratégia de seleção de características de interesse, assim avaliar parâmetros genéticos e correlação de características de crescimento e desenvolvimento em cultivar de gergelim altamente produtivas associando sua adaptabilidade a diferentes condições de cultivo e características agronômicas é de extrema importância para o processo de melhoramento desta oleaginosa.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Implantação, condução e coleta experimental

O experimento foi conduzido em campo, na Embrapa Algodão, localizada na cidade de Campina Grande - PB (latitude 07°13'S; longitude 53°31'W), no período de fevereiro a junho de 2022.

Antes da instalação em campo aberto, foram retiradas amostras de solo de 4 pontos diferentes da área de semeadura e levadas para análise no Laboratório de Solos e Nutrição de Plantas da Embrapa Algodão (Tabela 1).

Tabela 1. Análise dos componentes físico-químicos do solo.

FERTILIDADE DE SOLO											
pH H ₂ O	Complexo Sortivo (mmolc/dm ³)							%	mmolc/dm ³	mg/dm ³	g/kg
1:2,5	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	S	H+Al	T	V	Al ⁺³	P	M.O.
6,0	23,2	6,9	0,3	2,8	33,2	12,4	45,6	72,8	0,0	105,8	9,7

Fonte: Elaborada pela autora, 2021. (pH – Concentração de hidrogênio em solução do solo; Ca⁺² -Cálcio; Mg⁺² - Magnésio; Na⁺ - Sódio; K⁺- Potássio; S - enxofre; H+Al - Acidez potencial ou total; T – Capacidade de troca catiônica (CTC) subtraída da soma de bases (SB) mais o alumínio (Al); Al⁺³ – Acidez trocável; P – Fósforo; M.O. – Matéria orgânica).

Foram utilizadas a cultivar de gergelim BRS Pérola Negra, a qual foi cedida pela Embrapa Algodão, 3 inoculantes a base de bacilos, o pant001 (estirpe cedida pela empresa Geoclean), ESA 402 e M143 (estirpes cedidas pela Embrapa Semiárido, Petrolina- PB).

O delineamento experimental foi em blocos casualizados (DBC), sendo 3 (inoculantes) x 2 (níveis de nitrogênio químico) x 2 (regime hídrico), com 3 repetições, totalizando 36 tratamentos. Os tratamentos foram determinados da seguinte forma: 2 regimes hídricos (com e sem irrigação); (N1) manejo com inoculante pant001; (N2) manejo com inoculante M143; (N3) manejo com inoculante ESA 402; (N4) com nitrogênio químico (sulfato de amônia, SAM; 21% de N); e (N5) sem nitrogênio (testemunha absoluta).

O solo da área de semeadura foi corrigido com calcário dolomítico e gesso, e fertilizado com superfosfato triplo. A fertilização com nitrogênio químico (sulfato de amônia, SAM; 21% de N), para os tratamentos nitrogenados, foi feita em duas aplicações, a primeira aos 21 dias após a emergência (DAE), e a segunda no início da floração (32 DAE) (Figura 1). Também foi

feito uma adubação, para todos os tratamentos, com FTE BR – 12 (micronutrientes) após 32 dias da emergência (DAE).

Figura 1. Aplicação de nitrogênio químico para os tratamentos nitrogenados 21 dias após a emergência.

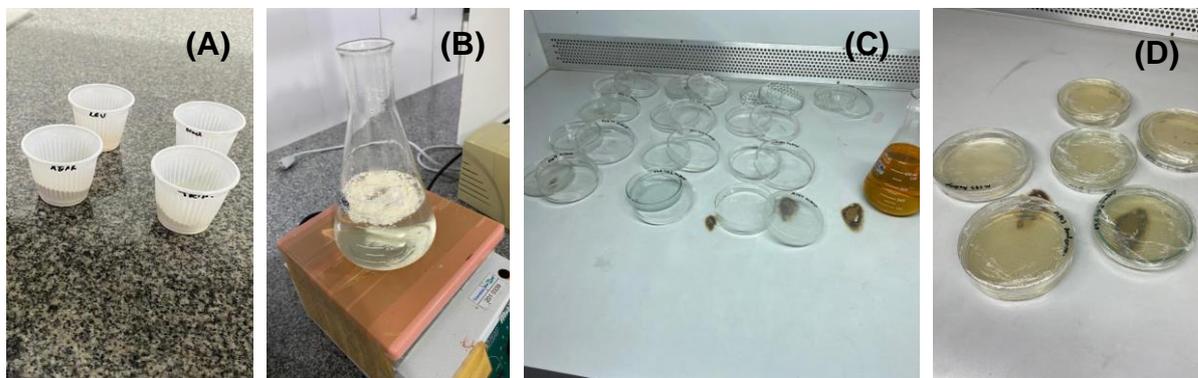


Fonte: imagens da pesquisa, 2023.

3.2 Preparo dos inoculantes

As estirpes (ESA 402 e M143) foram estriadas em meio sólido LB (Luria Bertani), contendo 5 g de caseína, 2,5 g de extrato de levedura, 5 g de NaCl, 7 g de ágar e 300 mL de água destilada. Em seguida, a mistura foi colocada em agitador magnético para homogeneização, após a mistura homogeneizada, o pH foi ajustado para 7,0 e o volume completado com água destilada para 500 mL. O meio foi transferido para um erlenmeyer e autoclave por 15 min a 121 °C (EMBRAPA, 1999). Posteriormente, do meio sólido foram vertidos 20 mL em placas de petri autoclavadas e identificadas, em seguida incubadas por 24 horas a 28 °C, até a formação de colônias bacterianas (Figura 2).

Figura 2. Reagentes após a pesagem para o preparo do meio sólido (A), mistura pronta para homogeneização em agitador (B), meio sólido e placas prontas para estriar as estirpes (C) e placas já estriadas prontas para incubação (D).



Fonte: imagens da pesquisa, 2023.

Para o preparo do inoculante, em meio líquido, foi preparado o meio LB, conforme descrito anteriormente, sem adição do ágar. Duas colônias bacterianas de cada estirpe foram coletadas, inoculadas em meio líquido e incubadas em Shaker a 28 °C, 180 rpm, por 72 horas.

A densidade óptica (DO) foi avaliada em espectrofotômetro a 540 nm. Uma alíquota de 1 mL de cada inoculante foi utilizada para avaliar e mensurar as unidades formadoras de colônias (UFC/mL⁻¹) e padronizar em 1 x 10⁹ células mL⁻¹.

O inoculante, à base de estirpes de *B. subtilis* pant001, cedido pela empresa Geoclean/UFMT, foi usado diretamente na inoculação.

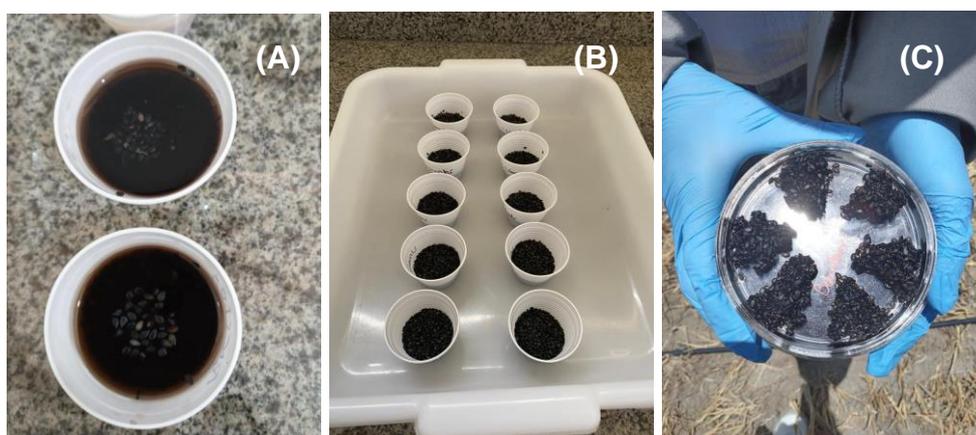
3.3 Desinfestação e inoculação das sementes

Foram utilizadas aproximadamente, 10 g de sementes de gergelim BRS Pérola Negra por parcela experimental. Antes da inoculação as sementes foram separadas em copos descartáveis de 50 mL e submetidas a um processo de desinfecção que incluiu uma imersão de 30 segundos em etanol a 70%, seguida por imersão em hipoclorito de sódio a 1% por 3 minutos e, por fim, lavadas 10 vezes com água destilada para garantir a remoção completa de quaisquer resíduos (VINCENT, 1970) (Figura 3).

Com auxílio de uma espátula (uma para cada inoculante) as sementes desinfestadas foram colocadas em placas de petri (já identificadas por tratamento) e embebidas com os inoculantes em quantidade suficiente para cobri-las. Após 10 min as sementes foram levadas

para o campo e distribuídas, de acordo com os tratamentos, em sulcos de aproximadamente 2 cm de profundidade.

Figura 3. Sementes durante (A) a imersão em etanol a 70%, após imersão e lavagem em água destilada (B) e inoculadas prontas para o plantio (C).



Fonte: imagens da pesquisa, 2023.

3.4 Manejo em campo

O plantio das sementes de gergelim BRS Pérola Negra foi realizado em campo no dia 21 de fevereiro de 2022. Durante o período do experimento foi registrado precipitação pluviométrica, de aproximadamente 371,4 mm.

Após a semeadura foram feitas regas, diariamente, exceto nos dias de chuva; as regas foram realizadas duas vezes ao dia uma nas primeiras horas da manhã e outra no final da tarde, por aproximadamente 3 min para cada tratamento. As plantas foram irrigadas por sistema de gotejamento, com espaçamento entre os gotejadores de 20 cm, a vazão por gotejador foi, em média, de 63 mL a cada 3 min.

Dezenove dias após a emergência (DAE) foi realizado o desbaste, deixando 20 plântulas por parcela. Durante o ciclo, foram realizadas duas capinas manuais para eliminar plantas invasoras e evitar insetos.

Após 35 dias de emergência das plântulas a rega foi suspensa durante 6 dias. No entanto, durante o período de suspensão foi registrada de 18,6 mm. Durante esse período, as plantas do tratamento controle continuaram recebendo irrigação suplementar.

3.5 Avaliações agronômicas

Após 110 dias da semeadura, no final do ciclo foram avaliadas as seguintes variáveis: altura de planta (cm), altura de inserção do primeiro fruto (cm), número de cápsulas por planta, número de cápsulas abertas, diâmetro e comprimento de cápsula (mm), peso total e de 100 sementes (g), massa da parte aérea (g) e de raízes seca (g).

A altura de planta foi feita com auxílio de uma fita métrica, bem como a altura de inserção do primeiro fruto, a altura de planta foi feita medindo da base até o ápice da haste principal da planta. A contagem de cápsulas por planta e de cápsulas abertas foi feita manualmente. O diâmetro e comprimento de cápsula foi mensurado com um paquímetro digital. Para determinação da massa da seca da parte aérea e das raízes, utilizou-se de uma estufa de circulação de ar forçada a 65 °C, onde ficaram por, aproximadamente, 72 horas, até atingir massa constante, e pesadas em balança analítica. O comprimento da raiz foi feito com auxílio de uma régua, medindo a raiz principal. A massa de 1000 sementes e a massa total de sementes, foram, também, obtidas em balança analítica; a contagem de 1000 sementes foi feita, mecanicamente, com uso de um contador eletrônico de sementes e grãos (Modelo ESC2008, Sanick).

3.6 Análise de nitrogênio

Para análise de nitrogênio foram utilizadas folhas da parte aérea da planta, coletadas no final do ciclo. As folhas foram mantidas em sacos kraft e em estufa de circulação forçada de ar por 72 h a 65 °C, depois trituradas em moinho de facas (até ficar em consistência de pó) e levadas para o laboratório de solos e nutrição de plantas da Embrapa algodão, onde foram analisadas de acordo com o método de digestão sulfúrica desenvolvido por Kjeldahl e descrito por Bezerra Neto e Barreto (2011). Foi feita uma pré-digestão a frio, em temperatura ambiente, durante 12 horas, de uma mistura contendo uma alíquota do material vegetal seco (2 mg), 50 mg de sulfato de sódio, 0,5 mg sulfato de cobre e 5 mL de ácido sulfúrico; em seguida a solução foi aquecida em um bloco digestor a 350 °C, até que toda matéria orgânica estivesse dissolvida (digerida) e a solução na coloração clara. Posteriormente, 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, 1 mL de silicato de sódio e 2 mL do reagente de Nessler, sendo o volume completado com água deionizada para 50 mL. A leitura foi realizada em espectrofotômetro a 410 nm. De acordo com método proposto por Alcantara et al. (2014) foi

calculado o nitrogênio acumulado na parte aérea a partir da multiplicação do teor de nitrogênio x massa seca da parte aérea.

3.7 Análise de fósforo

Para análise de fósforo as folhas da parte aérea da planta, coletadas no final do ciclo, foram mantidas em sacos kraft e em estufa de circulação de ar por 72 h a 65 °C, depois trituradas em moinho de facas (até ficar em consistência de pó).

Uma solução contendo uma alíquota do material vegetal seco (2 mg), 50 mg de sulfato de sódio, 0,5 mg sulfato de cobre e 5 mL de ácido sulfúrico, foi preparada para a pré-digestão a frio em temperatura ambiente, durante 12 horas; em seguida a solução foi aquecida em um bloco digestor a 350 °C até que toda matéria orgânica estivesse dissolvida e a solução na coloração clara. Uma alíquota de 5 mL do extrato digerido foi adicionada a um balão volumétrico (50 mL), contendo 10 mL de solução diluída de molibdato e, aproximadamente 40 mg de ácido ascórbico e, agitado até a homogeneização da mistura. A leitura foi realizada em espectrofotômetro a 660 nm. O teor de fósforo nas amostras foi obtido a partir da relação entre valor de absorvância e concentração, de acordo com o método de Nogueira e Souza (2005).

3.8 Atividades enzimáticas

Para análise das atividades enzimáticas (SOD e APX) foram utilizadas folhas frescas, coletadas no 5º dia da suspensão das regas, envolvidas em papel alumínio e armazenadas sob refrigeração a -80 °C.

Para extração das proteínas totais, foi colocada uma amostra de 0,2 g de folha e uma esfera (6 mm) de aço inox em microtubos de 2 mL, adicionado 1,5 mL de tampão de extração (fosfato de potássio 50 mM, pH 7,0, contendo ácido L-ascórbico 1 mM, EDTA 0,1 mM e polivinilpirrolidona PVP 4%) e levado para maceração em Mini Beadberther por cerca de 1 minuto. Em seguida, os tubos de cada amostra foram centrifugados por 20 minutos a 4 °C a 13.000 rpm, o sobrenadante foi transferido para microtubos de 1,5 mL, identificados e armazenados sob refrigeração a -80 °C (MAIA et al., 2012). A quantificação das proteínas totais foi realizada pelo método de Bradford (1976).

Para avaliação da atividade enzimática da superóxido dismutase (SOD), foi preparada uma solução mix contendo: tampão fosfato de potássio 50 mM, pH 7,8; EDTA (Ácido Etilenodiamino Tetra-acético) 0,1 mM; NBT (Cloreto de Azul Nitrotetrazólio) 0,075 mM e

Metionina 13 mM. Em cada tubo foram adicionados 40 μ L de extrato proteico foliar, 1760 μ L da solução mix e 200 μ L de riboflavina; para os brancos, os quais não vai extrato proteico, foram adicionados 1800 μ L de mix e 200 μ L de riboflavina. As amostras foram homogeneizadas e incubadas à temperatura ambiente, por 35 minutos e, em seguida, as reações foram analisadas em espectrofotômetro a 560 nm (GIANNOPOLITIS et al., 1977). As análises foram feitas em triplicata.

A análise da ascorbato peroxidase (APX) foi baseada no método de Nakano e Asada (1981). Preparou-se uma solução mix contendo: tampão fosfato de potássio 50 mM, pH 7,0; EDTA 0,1 mM e ácido ascórbico 5 mM. Em uma cubeta de quartzo foram pipetados 1700 μ L da solução mix, 100 μ L do extrato proteico e 200 μ L de peróxido hidrogênio 1 mM e, em seguida, foram avaliadas em espectrofotômetro 290 nm, a cada 10 segundos por 1 minuto, com análises realizadas em triplicata. A cada amostra o equipamento foi calibrado com 2 mL de mix.

3.9 Pigmentos Fotossintetizantes

Para a determinação do conteúdo de clorofila a, b e total ($a + b$), e carotenoides, amostras de 0,1 g de tecido vegetal, coletada no 5º dia da suspensão da rega, foram maceradas em cadinhos congelados (para preservar as amostras) com adição de carbonato de cálcio diluído em 10mL de acetona 80% (LICHTENTHALER, 1987). Em tubos de ensaio identificados, a solução diluída foi filtrada com auxílio de funis de vidro, contendo um filtro quantitativo de faixa azul (velocidade de filtragem moderada). Em seguida, em espectrofotômetro, foram feitas leituras da solução resultante nos comprimentos de onda 470, 647, 663 e 710 nm. As análises foram realizadas na presença de luz fluorescente verde.

3.10 Análises estatísticas

Os dados coletados foram submetidos à análise de variância ($p \leq 0,05$) e as médias comparadas pelo teste F utilizando o programa estatístico SISVAR versão 5.6. O GraphPad versão 9.5, foi utilizado para gerar os gráficos e o programa Genes para análises de correlação entre caracteres agrônômicos e fisiológicos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variáveis agronômicas

O ciclo da cultivar BRS Pérola Negra foi de 123 dias, contando da semeadura até a maturação dos frutos. Nesse período, foi possível observar que as sementes inoculadas com bacilos apresentaram uma rápida germinação, com aparecimento do caulículo após o terceiro dia e emergência completa após seis da semeadura.

Considerando os resultados da análise de variância, as variáveis altura de planta e altura do 1° fruto apresentaram significância a $p \leq 0,01$ para regime hídrico e tratamentos, já a massa da raiz seca, massa total da parte aérea seca e comprimento de raiz foram significativos para o regime hídrico, tratamentos e para interação regime hídrico X tratamentos (Tabela 2).

Tabela 2. Resumo de análise de variância para variáveis altura da inserção do primeiro fruto (AIF) (cm), altura da planta (ALTP) (m), massa da raiz seca (MRS) (g), comprimento da raiz (CR) (cm) massa total da parte aérea seca (MPAS) (g).

Fonte de variação	GL	Q. M.				
		AIF	ALTP	MRS	CR	MPAS
Regime hídrico	1	5695,2740**	0,7114**	370,5161**	13,0812**	945336,61**
Tratamentos	4	163,6470 ^{ns}	0,0136 ^{ns}	48,1256**	5,6959**	493467,94**
Regime hídrico X tratamentos	4	183,8553**	0,0299**	161,7929**	6,7948**	41857,77**
Bloco	2	0,4344 ^{ns}	0,0003 ^{ns}	26,0144 ^{ns}	0,4129 ^{ns}	1437,04 ^{ns}
Erro	18	38,6180	0,0058	7,9457	0,3998	7864,26
CV %		9,74	4,75	20,71	5,66	8,77
Média geral		63,81	1,61	13,61	11,18	1011,29

Fonte: dados da pesquisa, 2023. (** significância no nível de 1% de probabilidade pelo teste F; ns – Não significativo).

Para altura de inserção do primeiro fruto identificou-se que houve diferença estatística entre os regimes hídricos (Figura 4A). Na condição não irrigada foi observado que os tratamentos inoculados com ESA 402 e M143 obtiveram as maiores alturas de inserção do primeiro fruto, com médias de 89,78 cm e 79,67 cm, respectivamente, diferindo estatisticamente do tratamento com nitrogênio com média de 63,83 cm. Na condição irrigada não houve diferença estatística dentre todos os tratamentos.

Ao analisar altura de planta, observou-se diferença significativa entre os regimes hídricos (Figura 4B). Na condição não irrigada os tratamentos inoculados com pant001, M143 e ESA 402 exibiram as maiores médias (1,83 m, 1,82 m e 1,82 m, respectivamente), diferindo

estatisticamente do tratamento sem nitrogênio, o qual obteve a menor média (1,58 m). Para a condição irrigada não houve diferença estatística entre os tratamentos. Desta forma, fica evidente que os tratamentos inoculados com bacilos foram eficazes para o crescimento das plantas sob condição de restrição hídrica. De acordo com Novo et al. (2018), a altura de planta pode estar relacionada com a produção de hormônios (ação direta dos bacilos) como o ácido abscísico, importante regulador de crescimento das plantas. Corroborando com este estudo, Lima et al. (2023) verificaram aumento da altura de plantas de genótipos de gergelim inoculados com bacilos sob estresse hídrico.

A análise de massa da raiz seca (Figura 4C) apontou diferença significativa entre os regimes hídricos para os tratamentos M143 e com nitrogênio. O tratamento inoculado com M143, na condição não irrigada, obteve a maior massa da raiz seca (28,63 g), diferindo dos demais tratamentos, a menor média para massa da raiz seca foi apresentada pelo tratamento sem nitrogênio (10,79 g). Na condição irrigada, os tratamentos inoculados com ESA 402 e pant001 expôs as maiores médias (16,55 g e 12,60 g, respectivamente), não diferindo entre eles.

Carvalho et al. (2019), ao analisar os efeitos dos bacilos em milho e sorgo sob condição de estresse hídrico, concluíram que as plantas inoculadas aumentaram as raízes mais grossas e, conseqüentemente, aumentaram o peso seco da raiz, em comparação ao controle.

Em relação ao comprimento da raiz, na condição não irrigada não observou diferença estatística entre os tratamentos (Figura 4D), porém o tratamento inoculado com Pant001 demonstrou uma tendência fora dos padrões com maior comprimento de raiz (12,92 cm) e o tratamento sem nitrogênio o menor comprimento de raiz (11,42 cm). Na condição irrigada o tratamento com nitrogênio apresentou maior comprimento de raiz (13,17 cm), seguindo do tratamento M143 (11,50 cm), diferindo estatisticamente entre eles. Já o tratamento sem nitrogênio obteve o menor comprimento de raiz (8,03 cm).

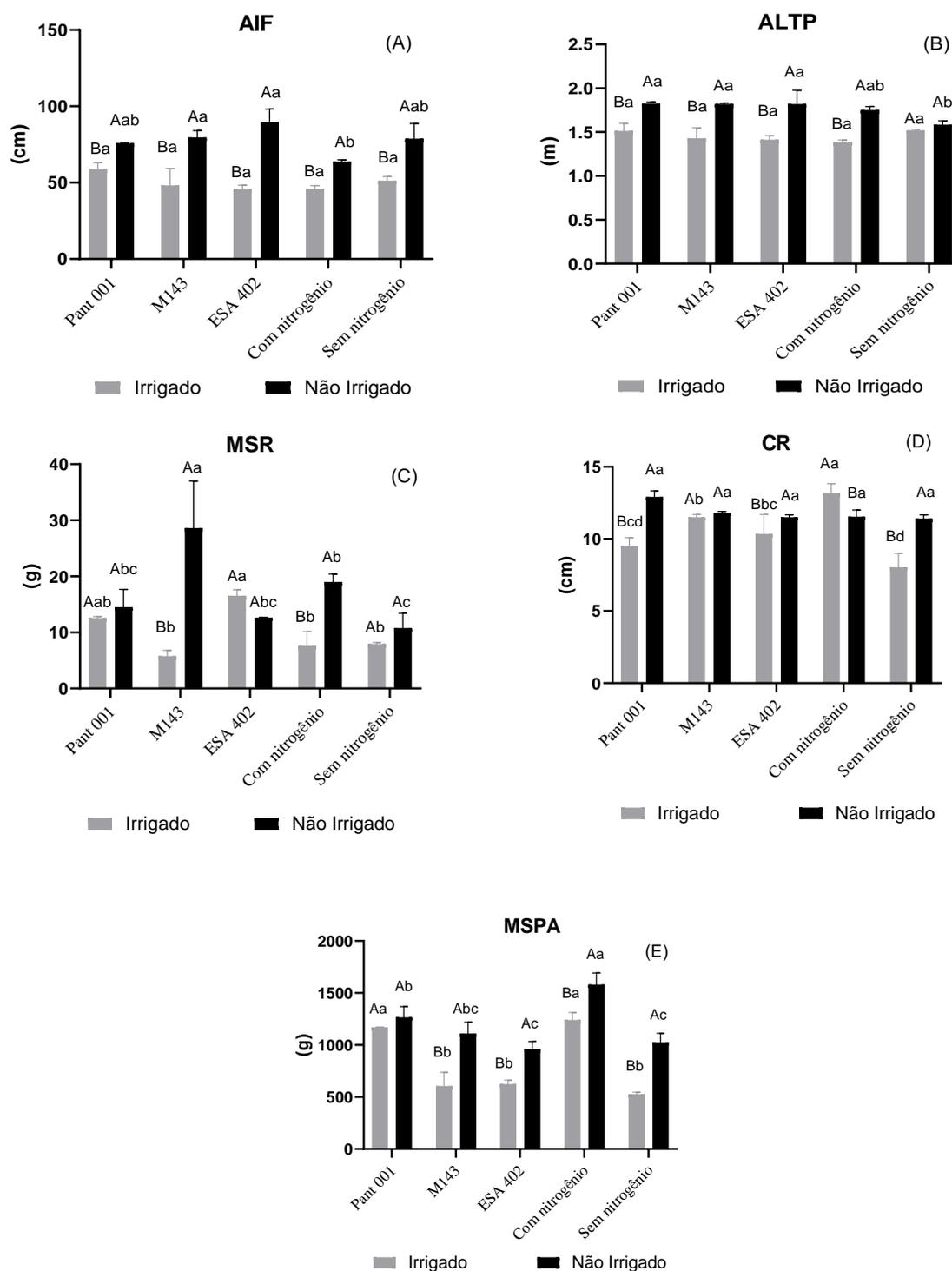
Os resultados obtidos de massa da raiz seca e comprimento da raiz indicam que os inoculantes foram eficientes no desenvolvimento e crescimento do sistema radicular. É importante ressaltar que a rizosfera é a região primária de absorção de água e nutrientes e também onde ocorre importantes processos fisiológicos, químicos e biológicos. Portanto, quanto maior o crescimento do sistema radicular maior será a absorção de água e nutrientes (HASHIM et al., 2019).

Para massa total da parte aérea seca (Figura 4E), houve diferença estatística entre os regimes hídricos. Na interação inoculantes e regimes hídricos, o tratamento com nitrogênio seguido do tratamento inoculado com pant001, sob restrição hídrica, tiveram as maiores médias para massa total da parte aérea seca (1.580 g e 1.266 g, respectivamente), diferindo

estatisticamente entre eles. Na condição irrigada, os tratamentos com nitrogênio e inoculado com pant001 exibiram as maiores médias para massa total da parte aérea seca (1.242 g e 1.171 g) mas não diferiram entre si, porém diferiram dos demais tratamentos. A menor massa da parte aérea seca foi observada no tratamento sem nitrogênio (526,67 g). O aumento da massa da parte aérea seca pode estar relacionado com maior teor de nitrogênio nas folhas proporcionados pelo acúmulo de nitrogênio disponibilizado para as plantas e, ainda, devido a participação de fotoassimilados e interceptação radicular (CRUSCIOL et al. 2007; TEODORO et al., 2015).

Regis (2022) verificou um aumento de 10% na massa da parte aérea seca, em plantas de gergelim inoculadas com cepas de *Bacillus* sob condição de estresse hídrico. Esse achado confirmam os efeitos positivos dos *Bacillus* em plantas sob estresse hídrico e corroboram com os resultados desta pesquisa.

Figura 4. Variáveis agrônômicas: altura de inserção do primeiro fruto (AIF) (A), altura de planta (ALTP) (B), massa da raiz seca (MRS) (C) comprimento de raiz (CR) (D) e massa da parte aérea seca (MPAS) (E) em gergelim BRS Pérola Negra inoculada com cepas de *Bacillus* (pant001, M143 e ESA 402) e submetido a restrição hídrica.



Fonte: dados da pesquisa, 2023. Letras maiúsculas representam a comparação dentre os regimes hídricos e as letras minúsculas comparam os tratamentos dentro de cada regime hídrico.

De acordo com a análise de variância (Tabela 3), as variáveis número de cápsulas, número de cápsulas abertas e comprimento de cápsula foi significativo a $p \leq 0,01$ para fatores regime hídrico, tratamentos e interação regime hídrico x tratamentos e significância a $p \leq 0,05$ para diâmetro de cápsula para a fonte de variação regime hídrico.

Tabela 3. Resumo da análise de variância das variáveis número de cápsulas (NC), número de cápsulas abertas (NCA), comprimento (CC) e diâmetro (DC) de cápsula (mm).

Tabela de análise de variância					
Fonte de variação	GL	Q.M.			
		NC	NCA	CC	DC
Regime hídrico	1	8057,65**	6163,33**	48,56**	0,35*
Tratamentos	4	2573,21**	2749,78**	14,67**	0,36**
Regime hídrico X tratamentos	4	2211,62**	3872,92**	17,25**	0,56**
Bloco	2	5,27	15,83	0,07	0,03
Erro	18	252,39	278,43	0,62	0,06
CV %		13,08	16,44	2,87	3,57
Média geral		121,49	101,47	27,46	7,10

Fonte: dados da pesquisa, 2023. (**significativo no nível de 1% pelo Teste F).

Tendo como base os resultados estatísticos para o número de cápsulas, foi possível identificar que na condição não irrigada, houve diferença estatística entre o tratamento inoculado M143 e o sem nitrogênio, sendo o tratamento inoculado com M143 com maior número de cápsulas (179), um aumento de 93,34% na produção de cápsulas, em comparação ao tratamento controle (sem nitrogênio) o qual obteve o menor número de cápsula (93). Na condição irrigada, o tratamento nitrogenado e ESA 402 diferiram entre si (Figura 5A). É importante destacar que o número de cápsulas pode interferir na produção final; espera-se que quanto maior o número de cápsulas por planta, maior a produção de sementes, contudo, isso depende da quantidade de sementes existentes em cada cápsula.

Grilo & Azevedo (2013) avaliaram o crescimento e desenvolvimento de gergelim BRS seda sob condição de déficit hídrico e verificaram resultados significativos, média de 95 cápsulas por planta. Mesquita et al. (2013), em seu estudo com gergelim sob diferentes níveis de irrigação hídrica alcançou o número de 142 cápsula por planta. Contudo, os resultados desta pesquisa mostraram valores ainda maiores, média de 179 cápsulas por planta, indicando, assim, que o uso de bacilos pode ser uma alternativa vantajosa para aumentar a produtividade de frutos da cultura.

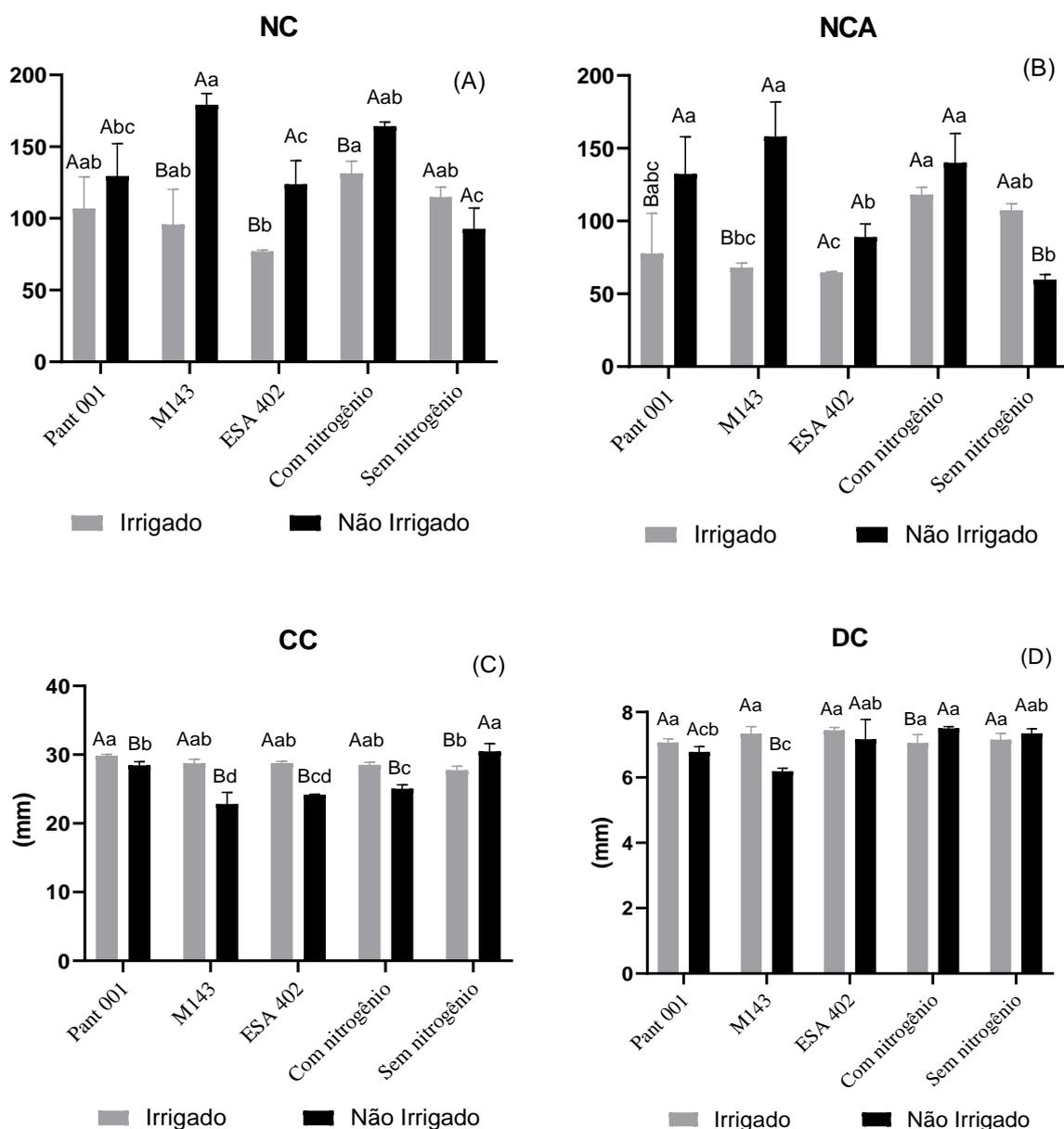
Em relação a análise de número de cápsulas abertas observou-se que o tratamento sem nitrogênio obteve o menor número de cápsulas abertas (59,66), na condição não irrigada. Na

condição irrigada, os tratamentos inoculados com pant001 (77,67), M143 (68,00) e ESA 402 (64,67) obtiveram as menores médias, demonstrando eficiência na redução do número de cápsulas abertas em campo, com redução de 51,92%, 73,53% e 82,49%, respectivamente, comparando com o tratamento nitrogenado. Vale ressaltar que os frutos do gergelim podem ser deiscentes ou indeiscentes, porém, um dos problemas que tem diminuído a produtividade é a perda de sementes durante o processo de colheita, devido a abertura de cápsulas na maturidade (frutos deiscentes), sendo assim, quanto menor o número de cápsulas abertas maior será a produtividade (ARRIEL et al., 2009). Visto que tratamentos inoculados com bacilos apresentaram redução de até 82,49% no número de cápsula abertas, pode-se dizer que o uso de bacilos pode ter influenciado no retardamento da abertura das cápsulas do gergelim BRS Pérola Negra irrigado (Figura 5B), evitando a perda de sementes em campo.

Os resultados obtidos indicaram que na condição não irrigada, o tratamento sem nitrogênio exibiu o maior comprimento de cápsula (30,47 mm), seguindo do tratamento inoculado com pant001 no qual apresentou o segundo maior comprimento de cápsula (28,45 mm), diferindo estatisticamente entre eles e dentre os demais tratamentos. Já para condição irrigada o tratamento com pant001, seguido do ESA e M143 exibiram as maiores médias (29,85 mm; 28,79 mm e M143 mm, respectivamente), e houve diferença estatística entre os tratamentos inoculados com pant001 e sem nitrogênio o qual apresentou o menor comprimento de cápsula (27,73 mm) (Figura 5C).

Ao avaliar os resultados estatísticos de diâmetro de cápsula foi possível verificar que na condição de redução hídrica o tratamento nitrogenado apresentou o maior diâmetro de cápsula (7,50 mm). Na condição irrigada, apesar dos tratamentos não apresentarem diferença estatística, os tratamentos inoculados com ESA 402 e M143 apontou uma tendência fora dos padrões estatísticos com os maiores diâmetros de cápsulas (7,44 e 7,34) (Figura 5D). As dimensões de cápsulas podem influenciar na produtividade, visto que quanto maior seu diâmetro e comprimento, provavelmente, maior o número de sementes por cápsula. Desta forma, os valores expressos neste trabalho sugerem que os inoculantes podem ser uma alternativa para aumentar o tamanho das cápsulas e, conseqüentemente, favorecer a produtividade.

Figura 5. Número de cápsulas (NC) (A), número de cápsulas abertas (NCA) (B), comprimento (CC) (C) e diâmetro (DC) de cápsula (D) em gergelim BRS Pérola Negra inoculada com cepas de *Bacillus* (pant001, M143 e ESA 402) e submetido à restrição hídrica.



Fonte: dados da pesquisa, 2023. Letras maiúsculas representam a comparação dentre os regimes hídricos e as letras minúsculas comparam os tratamentos dentro de cada regime hídrico.

Considerando o resumo da análise de variância (Tabela 4), é possível verificar que para a massa de mil sementes não houve diferença significativa entre as fontes de variação. Não houve diferença estatística tanto para condição não irrigada quanto para irrigada (Figura 6A).

Para massa total de sementes, houve diferença significativa a $p \leq 0,01$ para regime hídrico, tratamentos e interação regime hídrico x tratamento (Tabela 4). O tratamento nitrogenado e inoculado com ESA 402 na condição não irrigada, exibiram as maiores médias

(448,68 g e 388,61 g), com incremento de 36,96% e 15,45%, respectivamente, comparados ao tratamento sem nitrogênio. O tratamento inoculado com pant001 na condição irrigada apresentou a maior média (453,36 g) e diferiu dos demais tratamentos, apresentando um incremento de 151,43% se comparado ao tratamento sem nitrogênio (Figura 6B).

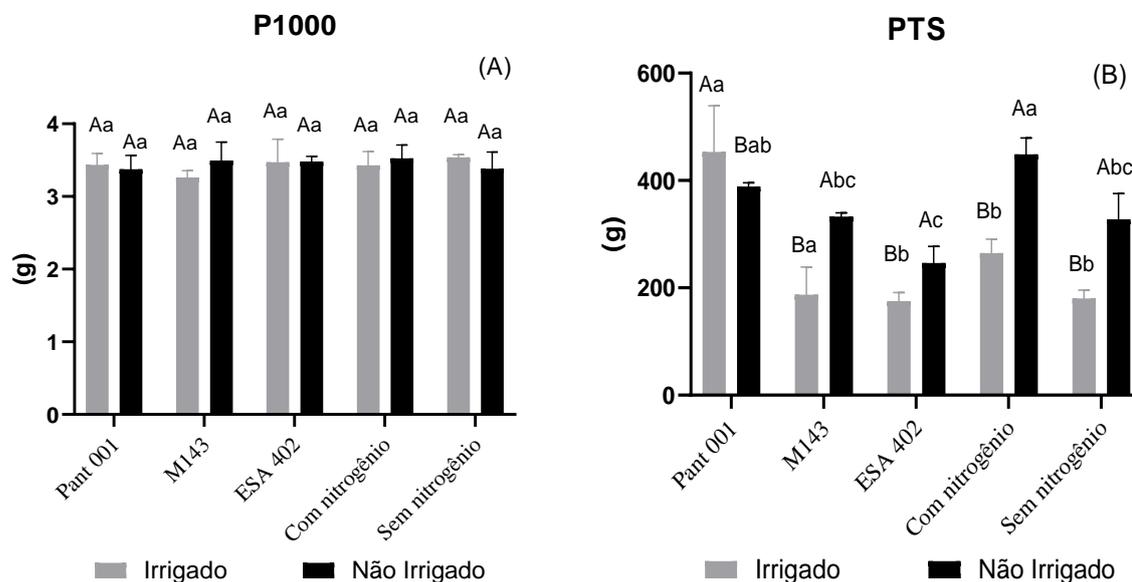
Silva et al. (2016) e Ribeiro et al. (2021) avaliaram o crescimento e a produção de genótipos de gergelim em diferentes níveis de adubação organomineral via fertirrigação, e também não encontraram diferença significativa para massa de 1000 sementes. Em contrapartida, Bandeira et al. (2018) estudaram a produção de gergelim em função da adubação biofertilizada e verificaram um aumento no peso de 1000 sementes com valores de 3,95 g, e identificaram um incremento na produção final de 42% em comparação com os tratamentos sem adubação. Esses achados corroboram com os resultados dessa pesquisa. Os resultados obtidos neste trabalho, sugerem que os *Bacillus* são eficazes para aumentar a produção.

Tabela 4. Resumo do quadrado para variáveis massa de 1000 sementes (P1000) e massa total de sementes (PTS).

Tabela de análise de variância			
Fonte de variação	GL	Q.M.	
		P1000	PTS
Regime hídrico	1	0,0045 ^{ns}	69872,76 ^{**}
Tratamentos	4	0,0124 ^{ns}	44341,31 ^{**}
Regime hídrico X tratamentos	4	0,0332 ^{ns}	14716,38 ^{**}
Bloco	2	0,0576 ^{ns}	2394,67 ^{ns}
Erro	18	0,0340	1458,57
CV %		5,37	12,71
Média geral		3,44	300,48

Fonte: dados da pesquisa, 2023. (**significativo no nível de 1% de probabilidade pelo teste F; ns – Não significativo).

Figura 6. Peso de 1000 sementes (P1000) (A) e peso total de sementes (PTS) (B) em gergelim BRS Pérola negra inoculada com cepas de *Bacillus* (pant001, M143 e ESA 402) e submetido a restrição hídrica.



Fonte: dados da pesquisa, 2023. Letras maiúsculas representam a comparação dentre os regimes hídricos e as letras minúsculas comparam os tratamentos dentro de cada regime hídrico.

4.2 Variáveis bioquímicas

4.2.1 Atividade superóxido dismutase (SOD) e ascorbato peroxidase (APX)

De acordo com os dados da análise de variância (Tabela 5), a atividade de SOD foi significativa a nível de $p \leq 0,01$ para as fontes de variação tratamentos e interação regime hídrico x tratamentos. Em relação a atividade de APX houve significância a $p \leq 0,01$ para fatores regime hídrico; tratamentos e interação regime hídrico x tratamentos.

Em relação à atividade de SOD, na condição não irrigada houve aumento na atividade dessa enzima para os tratamentos inoculados com pant001, que expôs a maior média (81,62), e para o tratamento ESA 402 (64,32), os quais diferiram do tratamento com nitrogênio, cujo a média foi menor (16,36). Nos tratamentos irrigados verificou-se que os tratamentos pant001 e M143 apresentaram aumento na atividade de SOD em comparação ao tratamento com nitrogênio (Figura 7A).

Tabela 5. Resumo do quadrado para atividade superóxido dismutase (SOD) e ascorbato de peroxidase (APX).

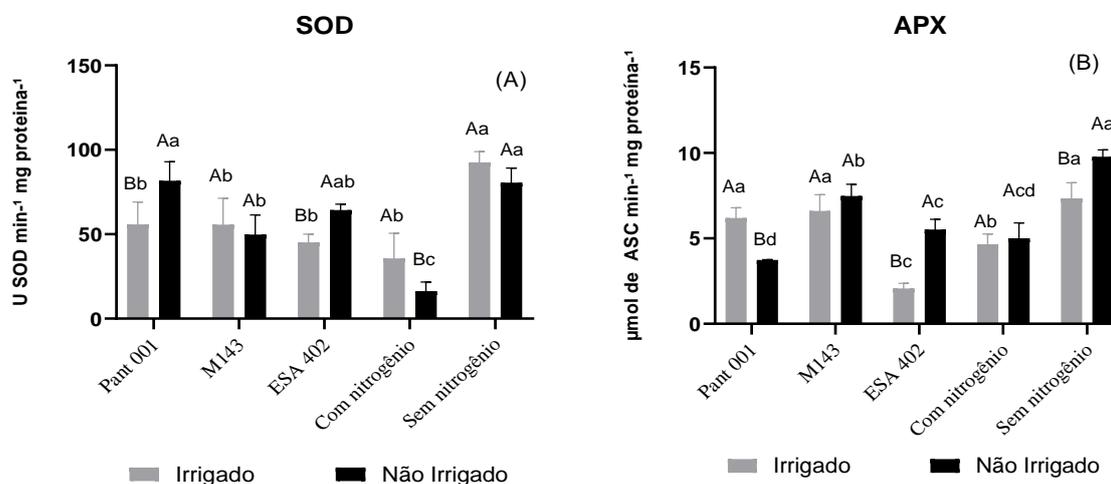
Tabela de análise de variância			
Fonte de variação	GL	Q.M.	
		SOD	APX
Regime hídrico	1	18,05 ^{ns}	6,49**
Tratamentos	4	2988,78**	22,25**
Regime hídrico X tratamentos	4	587,95**	7,68**
Bloco	2	115,29 ^{ns}	1,46 ^{ns}
Erro	18	106,57	0,32
CV %		17,87	9,67
Média geral		57,78	5,84

Fonte: dados da pesquisa, 2023. (** significativo no nível de 1% de probabilidade pelo teste F; ns – Não significativo).

Na análise da atividade da APX, na condição não irrigada, apesar do tratamento sem nitrogênio ter apresentado alta concentração de APX foi possível observar uma interação positiva dos tratamentos inoculados, sendo os tratamentos inoculados M143 e ESA 402 os quais demonstraram um aumento na atividade de APX e diferiram entre eles. Em relação a condição irrigada, foi identificado um aumento na atividade de APX nos tratamentos inoculados com M143 e pant001 (Figura 7B). Vale ressaltar que SOD e APX são consideradas enzimas capazes de diminuir os danos oxidativos causados pelas espécies reativas de oxigênio (EROs), o acúmulo desses radicais livres podem ocasionar danos às proteínas e ácidos nucleicos e levar até à morte celular (MILLER et al., 2010; CARNEIRO et al., 2011). Essas enzimas atuam em conjunto, sendo a SOD a primeira a ser ativada, cuja função pode ser resumida como a de uma primeira limpeza geral, preparando o ambiente celular para a ação das outras enzimas. Em sua função, a SOD é responsável pela conversão do radical superóxido ($\bullet\text{O}_2^-$) em peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e oxigênio (O_2); a APX da sequência à limpeza celular, com atuação na dismutação de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e sua conversão em água, diminuindo, assim, o estresse oxidativo (SHEHAB et al., 2010). De maneira geral, os resultados obtidos indicam que os bacilos foram importantes na ativação do mecanismo de defesa à restrição hídrica por meio do aumento da concentração das enzimas antioxidantes.

Corroborando com os resultados obtidos neste trabalho, Júnior et al. (2017), observaram aumento nas atividades de SOD e APX em plântulas de girassol submetidas a estresse hídrico e suplementadas com diferentes fontes de N. Lima et al. (2023) verificaram aumento na atividade de SOD e APX em gergelim inoculado com bacilos e sob condição de déficit hídrico.

Figura 7. Atividade de superóxido dismutase (SOD) e ascorbato peroxidase (APX) em gergelim BRS Pérola Negra inoculada com cepas de *Bacillus* (pant001, M143 e ESA 402) e submetido a restrição hídrica.



Fonte: dados da pesquisa, 2023. Letras maiúsculas representam a comparação dentre os regimes hídricos e as letras minúsculas comparam os tratamentos dentro de cada regime hídrico.

4.3 Pigmentos fotossintetizantes

Os resultados para clorofila *a* e total mostraram que houve diferença significativa ($p \leq 0,01$) para fonte de variância regimes hídricos, tratamentos e interação regime hídrico x tratamentos. Para os pigmentos fotossintetizantes clorofila *b* e total ($a + b$), houve diferença significativa ($p \leq 0,01$) para as fontes de variação tratamentos e interação regime hídrico x tratamentos como mostra no resumo da análise de variância (Tabela 6).

Tabela 6. Resumo do quadrado para pigmentos fotossintetizantes clorofila *a*, *b*, total e carotenoides.

Fonte de variação	GL	Quadrado Médio			
		Clorofila <i>a</i>	Clorofila <i>b</i>	Clorofila total	Carotenoides
Regime hídrico	1	0,0385**	0,0000 ^{ns}	0,0683 ^{ns}	0,0036**
Tratamentos	4	0,3239**	0,0356**	0,7004**	0,0127**
Regime hídrico X tratamentos	4	0,1974**	0,0391**	0,3235**	0,0101**
Bloco	2	0,0132 ^{ns}	0,0006 ^{ns}	0,0028 ^{ns}	0,0002 ^{ns}
Erro	18	0,0045	0,0010	0,0151	0,0002
CV %		6,47	8,26	9,04	5,39
Média geral		1,05	0,39	1,36	0,31

Fonte: dados da pesquisa, 2023. ** significativo no nível de 1% de probabilidade pelo teste F; ns – Não significativo.

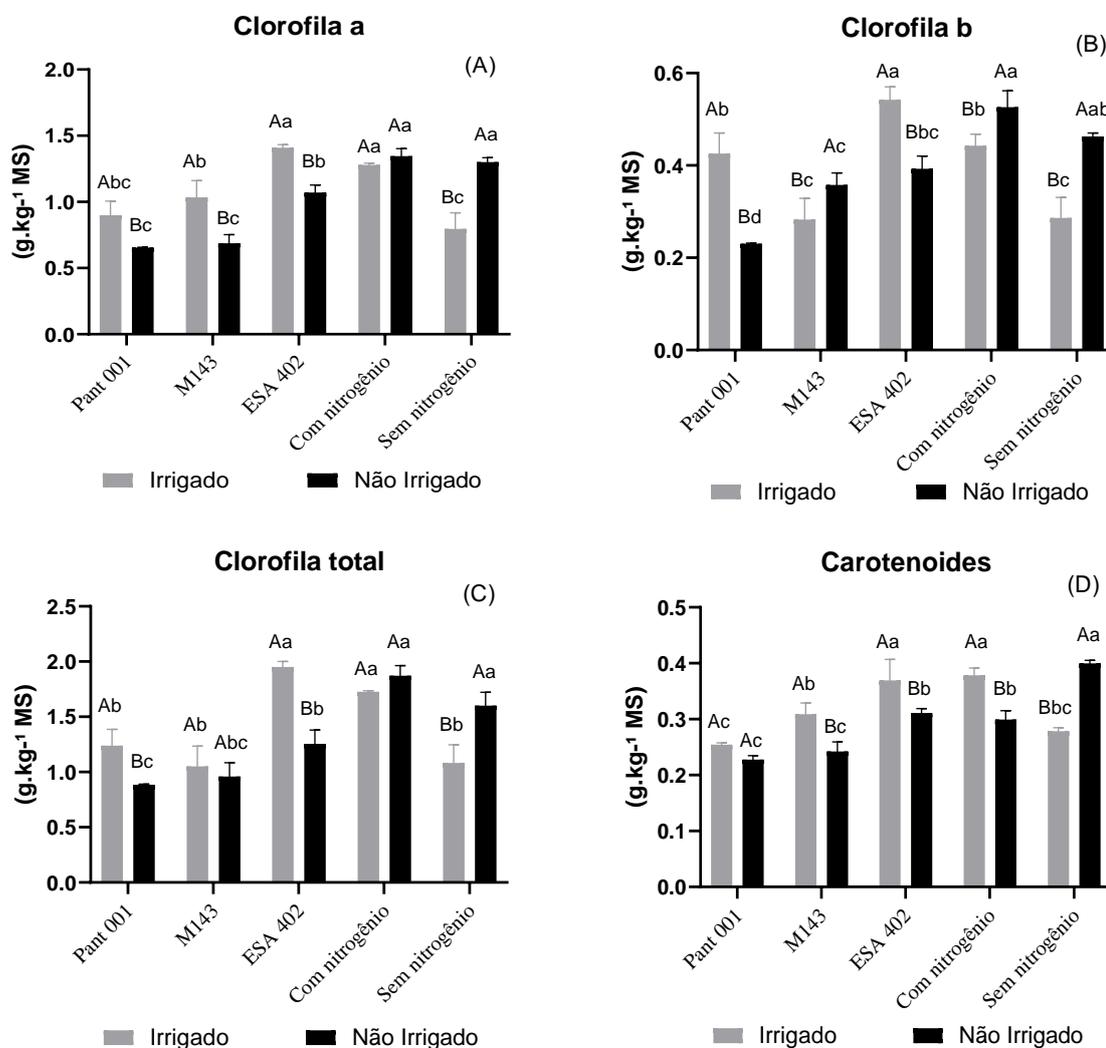
Na condição de restrição hídrica, apesar da concentração de clorofilas *a*, *b* e total (*a+b*) ter sido maior para o tratamento com nitrogênio com médias de 1,35 g.kg⁻¹ MS; 0,53 g.kg⁻¹ MS e 1,87 g.kg⁻¹ MS, respectivamente, o tratamento inoculado com ESA 402 também teve aumento na concentração de clorofilas. Na condição irrigada, foi observado aumento na concentração de clorofila *a* (1,41 g kg⁻¹ MS), *b* (0,54 g kg⁻¹ MS) e total (1,95 g kg⁻¹ MS) no tratamento inoculado com ESA 402 (Figura 8).

Na análise de carotenoides, na condição não irrigada, houve aumento na concentração de carotenoides no tratamento inoculado com ESA 402. Na condição irrigada, a maior concentração foi para o tratamento com nitrogênio (0,38 g.kg⁻¹ MS) (Figura 8). Vale salientar que o estresse hídrico pode reduzir o teor de clorofila, atividade fotossintética e, levar a senescência das folhas (TAIZ e ZEIGER, 2017).

Os pigmentos estão diretamente associados à atividade fotossintética, sendo a clorofila *a* aquela que mais absorve energia, a clorofila *b* e, também, os carotenoides são pigmentos acessórios ou auxiliares que atuam na absorção e transferência de energia radiante para os centros de reação (STREI et al., 2005). A capacidade de realizar a fotossíntese de forma altamente eficiente pode resultar em um aumento na produção agrícola, e essa relação depende diretamente da habilidade desses pigmentos em aproveitar a radiação disponível (SILVA et al., 2014).

Lima e colaboradores (2023) avaliaram rizobactérias como bioestimulantes do crescimento e da produção de cultivares de gergelim sob déficit hídrico e verificaram aumento nas concentrações de clorofila *a*, *b*, total (*a + b*) e carotenoides no tratamento fertilizado com nitrogênio, bem como os resultados desta pesquisa. Os mesmos autores afirmaram que esse aumento pode ocorrer devido a viabilização da síntese de composto fotossintéticos promovida pelo nitrogênio, visto que o nitrogênio é um componente essencial da estrutura química dos pigmentos. Sapucay e colaboradores (2020) também verificaram um aumento no teor de clorofila em milho inoculado com bacilos, bem como nos tratamentos com adubação nitrogenada.

Figura 8. Pigmentos fotossintetizantes clorofila a, b, total e carotenoides em gergelim BRS Pérola Negra inoculada com cepas de *Bacillus* (pant001, M143 e ESA 402) e submetido a restrição hídrica.



Fonte: dados da pesquisa, 2023. Letras maiúsculas representam a comparação dentre os regimes hídricos e as letras minúsculas comparam os tratamentos dentro de cada regime hídrico.

4.4 Análise de nitrogênio e fósforo

Os resultados de fósforo e nitrogênio foram obtidos a partir da análise das folhas de gergelim, colhidas no final do ciclo da cultura. Ao analisar nitrogênio, verificou-se que na condição de restrição hídrica, não houve diferença estatística entre os tratamentos (Figura 9A).

As plantas quando não submetidas a restrição hídrica, o maior teor de nitrogênio foi do tratamento pant001 (2,97 dag kg⁻¹).

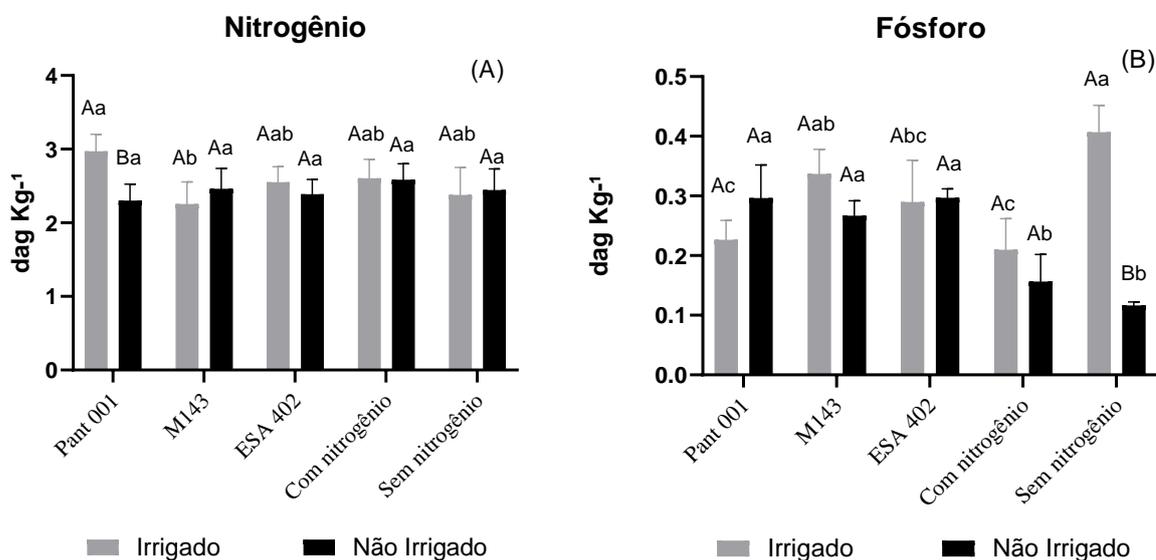
O nitrogênio é um macronutriente exigido essencial para as plantas e sua deficiência pode trazer danos à atividade fotossintética, abscisão foliar e inibição do desenvolvimento dos vegetais, em contrapartida, o aumento no suprimento deste nutriente pode aumentar sua alocação aos vários órgãos das plantas, área foliar e teor de clorofila (TAIZ & ZEIGER, 2017; ZENAWI et al., 2019).

Diaz et al. (2019) estudando isolados de *Bacillus* em algodão, verificaram que os teores de nitrogênio em plantas tratadas com isolados foram superiores ao controle. Esse achado, bem como os resultados obtidos neste estudo, sugere que os *Bacillus* podem ser promissores para aumentar a eficiência do nitrogênio nas plantas.

Em relação a fósforo, houve diferença significativa ($p \leq 0,05$) para interação regime hídrico X tratamento. Na condição não irrigada, ocorreu maior concentração de fósforo nas plantas inoculadas com ESA 402; pant001 e M143 (0,30 dag kg⁻¹, 0,30 dag kg⁻¹ e 0,27 dag kg⁻¹ respectivamente) sugerindo um aumento na disponibilidade de fósforo para as plantas de 150%, 150% e 125%, respectivamente, quando comparado ao tratamento sem nitrogênio. Na condição irrigada, constatou-se maior concentração de fósforo, nas plantas inoculadas com M143, com incremento de 61,90% na disponibilidade de fósforo para as plantas em comparação com o tratamento com nitrogênio (0,21 dag kg⁻¹) (Figura 9B). Para esses resultados, observa-se que os bacilos foram capazes de solubilizar o fósforo e disponibilizá-lo para as plantas, visto que o aumento do teor deste nutriente foi verificado nos tratamentos inoculados.

Esta pesquisa corrobora com o estudo de Carvalho et al. (2023), que ao trabalhar com *B. subtilis* como promotor de crescimento vegetal em soja, constataram maior eficiência no aproveitamento de fósforo e maior acúmulo de nitrogênio em diferentes cultivares inoculadas com diferentes doses do inoculante.

Figura 9. Nitrogênio e fósforo em gergelim BRS Pérola Negra inoculada com cepas de *Bacillus* (pant001, M143 e ESA 402) e submetido a restrição hídrica.



Fonte: dados da pesquisa, 2023.

4.5 Estimativa de correlação entre caracteres agrônômicos e fisiológico

Na correlação entre caracteres, as variáveis foram avaliadas independente do manejo adotado (bacilos, nitrogênio e regime hídrico). A partir da análise dos resultados da matriz de correlação fenotípica entre os caracteres (Tabela 8), foi possível observar que houve diferença significativa ($p \leq 0,01$) e correlação positiva entre os caracteres altura de inserção do primeiro fruto X altura de planta, massa da parte aérea seca X massa total de sementes, número de cápsulas X número de cápsulas abertas, clorofila *a* X clorofila *b*; total ($a+b$) e carotenoides, e, clorofila total ($a+b$) X carotenoides, sendo a correlação mais forte para os pares, número de cápsulas X número de cápsulas abertas (r_{fe} 0,94) e clorofila *a* X clorofila total ($a+b$) (r_{fe} 0,94). Entre os caracteres altura de planta X número de cápsulas, massa da raiz seca X número de cápsulas, massa da parte aérea seca X número de cápsula, diâmetro de cápsulas X clorofila *a* e total e clorofila total e carotenoides, houve diferença significativa ($p \leq 0,05$) e correlação fenotípica positiva, cujo os pares de diâmetro de cápsulas X clorofila *a* (r_{fe} 0,75) e clorofila total X carotenoides (r_{fe} 0,75) tiveram as mais altas correlações fenotípicas.

As correlações fenotípicas entre os caracteres comprimento de cápsulas X número de cápsulas foram negativas e significativas ($p \leq 0,01$). Já para os pares altura de planta X comprimento de cápsula, massa da raiz seca X comprimento de cápsula, massa da parte aérea

seca X fósforo, comprimento de cápsulas X número de cápsulas abertas, fósforo X clorofila *b* e clorofila *b* X Superóxido dismutase, houve diferença significativa ($p \leq 0,05$) e correlação negativa, dentre estes, a maior correlação foi entre os caracteres comprimento de cápsula X número de cápsula ($r_{fe} 0,79$). A correlação fenotípica ocorre entre caracteres porque muitos traços ou características em organismos vivos podem estar interconectados e influenciados por fatores genéticos e ambientais comuns (FALCONER & MACKAY, 1996). É importante destacar que essas correlações podem ser positivas ou negativas.

As estimativas de coeficiente de correlação positiva sugerem que os caracteres tiveram uma correlação direta, ou seja, indicam a tendência de as variáveis seguirem a mesma direção, à medida que os valores de magnitude (grau de expressão r_{fe}) aumentam para uma variável, possivelmente, aumentará para a outra, já a correlação negativa, indica tendência oposta, ou seja, se os valores de magnitude de uma variável aumentam, a outra tende a diminuir (NOGUEIRA et al., 2012; CASTRO et al., 2019).

Silva et al. (2011) sugeriram que os valores mínimos e máximos de cada variável dentro das fontes de variância mostram a magnitude considerável de expressão, ou seja, o maior valor pode representar alta variabilidade e o menor valor baixa variabilidade genética entre caracteres avaliados.

Os resultados deste estudo sugerem que um caractere influenciou, induziu mudanças positivas e negativas em outra caractere. Esses resultados foram semelhantes aos encontrados por Patil e R Loksha (2018) e Haibru et al. (2018) ao estudarem a correlação entre caracteres agrônômicos em gergelim. Vale ressaltar, que as pesquisas de correlação são importantes para o melhoramento genético, uma vez que pode auxiliar o melhorista durante o processo de seleção e proporciona uma compreensão dos elementos relacionados à produção.

Tabela 7. Estimativa de correlação fenotípica entre caracteres agronômicos e bioquímicos em gergelim BRS Pérola Negra inoculada com cepas de *Bacillus* (pant001, M143 e ESA 402) e submetido à restrição hídrica.

Caracteres	AIF	ALTP	CR	MRS	MPAS	CC	DC	NC	NCA	P100	PTS	N	P	Ca	Cb	Ct	Crt	SOD	APX
AIF	1	0,87**	0,29	0,45	0,37	-0,49	-0,40	0,40	0,25	0,12	0,38	-0,35	-0,25	-0,31	-0,14	-0,33	-0,26	0,27	0,34
ALTP			0,29	0,62	0,49	-0,69*	-0,48	0,66*	0,60	0,29	0,48	-0,34	-0,09	-0,45	-0,23	-0,39	-0,56	0,09	0,09
CR				0,16	0,56	-0,17	-0,25	0,35	0,34	-0,40	0,23	-0,60	-0,42	0,12	-0,01	0,06	0,13	-0,35	-0,21
MRS					0,40	-0,67*	-0,58	0,65*	0,60	0,47	0,40	-0,02	-0,21	-0,21	0,22	-0,03	-0,39	-0,34	-0,09
MPAS						-0,25	-0,18	0,65*	0,57	0,16	0,87**	0,11	-0,70*	0,06	0,27	0,20	-0,18	-0,50	-0,09
CC							0,47	-0,79**	-0,67*	-0,53	-0,07	0,21	-0,13	0,24	0,02	0,18	0,39	0,32	0,02
DC								-0,61	-0,64*	-0,11	-0,20	0,09	-0,17	0,75*	0,47	0,65*	0,60	-0,16	-0,16
NC									0,94**	0,44	0,48	-0,04	-0,16	-0,35	-0,09	-0,21	-0,50	-0,38	0,08
NCA										0,44	0,40	-0,05	0,01	-0,44	-0,22	-0,25	-0,56	-0,27	-0,11
P1000											0,11	0,50	0,03	0,02	0,37	0,26	-0,13	-0,15	-0,11
PTS												0,31	-0,62	-0,15	0,16	-0,01	-0,41	-0,27	0,08
N													-0,12	0,05	0,37	0,24	-0,08	-0,14	0,02
P														-0,54	-0,66*	-0,60	-0,43	0,44	-0,21
Ca															0,84**	0,94**	0,87**	-0,53	-0,20
Cb																0,93**	0,62	-0,64*	-0,20
Ct																	0,75*	-0,60	-0,32
Crt																		-0,18	0,04
SOD																			0,41
APX																			1

Fonte: dados da pesquisa, 2023. ** significativo no nível de 1% e * 5% de probabilidade pelo teste F. Variáveis: altura de inserção do primeiro fruto (AIF), altura de planta (ALTP), comprimento de raiz (CR), massa da raiz seca (MRS), massa da parte aérea seca (MPAS), comprimento (CC) e diâmetro (DC) de cápsula, número de cápsulas (NC), número de cápsulas abertas (NCA), massa de 1000 sementes (P1000), massa total de sementes (PTS), Nitrogênio (N), fósforo (P), clorofilas a, b, total e carotenoides (Ca, Cb, Ct e Crt), atividade de superóxido dismutase (SOD) e ascorbato peroxidase (APX).

5 CONCLUSÃO

O genótipo inoculado respondeu positivamente na linha de defesa contra as espécies reativas de oxigênio (EROs) aumentando a linha enzimática de defesa, sendo a SOD a mais responsiva.

Em relação ao fósforo, houve aumento de até 150% no teor de fósforo nas folhas das plantas inoculados com ESA 402, pant001 e M143 e sob restrição hídrica, em comparação ao tratamento sem nitrogênio.

Considerando o comportamento das plantas de gergelim BRS Pérola Negra inoculada e sob restrição hídrica, o inoculante mais responsivo foi o ESA 402.

Quanto a estimativa das correlações fenotípicas os caracteres que se correlacionaram significativamente, com associações altas e positivas, foram o número de cápsulas X número de cápsulas abertas (r_{fe} 0,94) e clorofila *a* X clorofila total ($a+b$) (r_{fe} 0,94) e negativa entre os caracteres comprimento de cápsulas X número de cápsulas (r_{fe} 0,79).

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, F. A. de; BELTRAO, N. E. de M.; LUCENA, A. M. A. de; OLIVEIRA, M. I. P. de; CARDOSO, G. D. Ecofisiologia do gergelim (*Sesamum indicum* L.). In: BELTRÃO, N.E. de M.; OLIVEIRA, M. I. P. de. (Ed.). **Ecofisiologia das culturas de algodão, amendoim, gergelim, mamona, pinhão-manso e sisal**. Brasília - DF: Embrapa Informação Tecnológica; Campina Grande: Embrapa Algodão, 2011. p. 163-194.

ARRIEL, N. H. C.; FIRMINO, P. de T.; BELTRÃO, N. E. de M.; SOARES, J. J.; ARAÚJO, A. E. de; SILVA A. C. FERREIRA, G. B. **A cultura do gergelim**. 1. Ed. Brasília - DF: Embrapa informação e tecnologia, 2007.

ALCANTARA, R.M.; XAVIER, G.R.; RUMJANEK, N.G.; ROCHA, M.M.; CARVALHO, J.S. Eficiência simbiótica de progenitores de cultivares brasileiras de feijão-caupi. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 1, p. 1-9, 2014.

ANTONIASSI, R. ARIEL, N. de C.; GONÇALVES, E.B.; FREITAS, S. C. de.; ZANOTTO, D. L.; BIZZO, H. R. Influência das condições de cultivo na composição da semente e do óleo de gergelim. **Revista Ceres**, v. 60, n. 3, p. 301-310, 2013.

ARRIEL, N. H. C.; BELTRÃO, N. E. de M. **Gergelim: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília - DF: Embrapa Informação Tecnológica; Campina Grande: Embrapa Algodão, 2009, p. 28 e p. 50.

AQUINO, J.P.A.; JUNIOR, F. B. de M.; ANTUNES, J.E.L., FIGUEIREDO, M. do V. B.; NETO, F de A.; ARAÚJO, A. S. F. de. Bactérias endofíticas promotoras de crescimento de plantas em milho e sorgo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.49, p.19, 2019.

ALMEIDA, M. C. R, LEITE, M.L de M. V.; JUNIOR, E. H. de S.; CRUZ, M. G. de. Crescimento vegetativo de cultivares de milho sob diferentes disponibilidades hídricas. **Magistra**, v. 29, n. 2, p. 161-171, 2018.

ALVES, K. C. S; ALMEIDA, M. E. M. de; GLÓRIA, J. C.; SANTOS, F. A. dos; PEREIRA, K. D; CASTRO; D. P. de; MARIÚBA, L. A. M. *Bacillus subtilis*: uma versátil ferramenta biotecnológica. **Scientia Amazonia**, v. 7, n. 2, p. 15-23, 2018.

BOTELHO, S. de C. C.; FIORESE, D. A.; ARIEL, N. H. C.; BOTELHO, F. N. Gergelim: **qualidade de grãos cultivados em Mato Grosso em função do tipo de colheita**. 2022.

BELTRÃO, N.E.M.; VIEIRA, D.J. O agronegócio do gergelim no Brasil. **Brasília: Embrapa Informação Tecnológica**. v. 17, p. 348, 2001.

BARRETO, N.D.S; DUDA, G.P.; OLIVEIRA, C. J.; JÚNIOR, A. B. A.; MENDES, A. M. S. Uso de fosfatos com diferentes solubilidades no conteúdo de macronutrientes da cultura do milho em dois ciclos de cultivo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31, 2007 Gramado. Conquistas e desafios da ciência do solo brasileira: **anais**. Porto Alegre: SBCS, 2007.

BARROS, J. Fertilidade do solo e nutrição das plantas. 2020. Disponível em: <<https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/28120/1/P.%20Pedag%c3%b3gica%20-%20Fertiliza%c3%a7%c3%a3o%20das%20culturas.pdf>> Acesso em 10 de fevereiro de 2023.

BIZARI, E. H.; VAL, B. H. P.; PEREIRA, E. de M.; MAURO, A. O. di; TREVISOLI, S. H. U. Selection indices for agronomic traits in segregating populations of soybean. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 48, p. 110-117, 2017.

BATES, L.; WALDREN, R.P.; TEARE, I.D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant And Soil**, v. 39, p. 205-207, 1973.

BUENO, C. J.; FISCHER, I. H.; ROSA, D. D. e FURTADO, E. L. Produção de enzimas extracelulares por *Fusarium solani* de maracujazeiro amarelo. **Tropical Plant Pathology**, v. 34, p. 343-346, 2009.

BRADFORD, M.M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analitycal Biochemistry**, v. 72, p. 248- 254, 1976.

BODHANKAR, S.; GROVER, M.; MALLAPA, M.; REDDY, G.; GHOSH, D.; MOHAPATRA, S. The expression of selected drought responsive genes of maize is influenced by endophytic bacterial inoculation. **Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences**, v. 10, n. 2, p. 267-272, 2020.

BANDEIRA, L. B. SOUSA, V. T. da S.; BANDEIRA, C. de M.; GÓES, G. B. de; SANTOS, J. B. L. dos. Produção de gergelim adubado com biofertilizante production of bergery fertilizer with biofertilizer. In: III CONGRESSO INTERNACIONAL DAS CIÊNCIAS AGRÁRIAS – COINTER. (anais), 2018. Disponível em: <https://cointer.institutoidv.org/inscricao/pdvagro/uploadsAnais/PRODU%C3%87%C3%83O-DE-GERGELIM-ADUBADO-COM-BIOFERTILIZANTE.pdf> Acesso em: 20 de março de 2023.

BEZERRA NETO, E.; BARRETO, L.P. Análises químicas e bioquímicas em plantas. **Imprensa Universitária da UFRPE**. p. 261, 2011.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: segundo levantamento da safra 2018/2019**, agosto, 2020. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/gaos/boletim-da-safra-de-gaos?limitstart=0>>. Acesso em: 03 de fev. de 2023.

CRUZ, N. F. F. DA S.; NASIMENTO, L.F.J. do.; SANTOS F. R.; JÚNIOR, L. A. Z.; CUNHA, E.; ROCHA, E. O. Características e tratos culturais do gergelim (*Sesamum indicum* L.). **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 8, n. 4, p. 665–675, 2019.

CASTRO, P. R. de C. e CARVALHO, M.E.A. **Aminoácidos e suas aplicações na agricultura**. 2014. Disponível em <<https://www.esalq.usp.br/biblioteca/sites/default/files/publicacoes-a-venda/pdf/SPR57.pdf>>

CASSÁN, F. VANDERLEYDEN, J.; SPAEPEN, S. Physiological and agronomical aspects of phytohormone production by model plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) belonging to the genus *Azospirillum*. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 33, n. 2, p. 440–459, 2014.

CARVALHO, M. A. C. SÁ, M. E de.; CAMPOS, D. T. da S.; MACHADO, A. P.; JUNIOR, A. F. C. *Bacillus subtilis* UFMT-Pant001 as a plant growth promoter in soybean in a greenhouse. **African Journal of Agricultural Research**, v. 19, n. 2, p. 161-169, 2023.

CHAVARRIA G. E SANTOS H.P. **Plant water relations: absorption, transport and control mechanisms**. In: Advances in selected plant physiology aspects (eds. by Montanaro G & Dichio B), pp. 105-132. Rijeka: Intech.

CAMPOS A. J. de M. SANTO, S.M. e NACARATH, I.R.F.F. Estresse hídrico em plantas: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 15, p. 311101523155, 2021.

CARVALHO, C. G.; VELOSO, C.C. V.; GODINHO, B. T.V.; PAIVA, C. A. de O.; GOMES, E. A.; MAGALHÃES, P. C.; LANA, U.G. de P.; TINOCO, F.M. de S. Efeitos de bactérias promotoras de crescimento em pântulas de milho sob estresse hídrico induzido por Polietilenoglicol 6000 / Chainheny Gomes. Sete Lagoas: **Embrapa Milho e Sorgo**. 29 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Milho e Sorgo, ISSN 1679- 0154; 196).

COURI, S. e DAMASSO, M.C.T. Enzimáticos. Portal Embrapa, 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/tecnologia-de-alimentos/processos/tipos-de-processos/enzimaticos>> Acesso em 15 de março de 2023.

CARNEIRO, M.M.C.; DEUNER, S.; OLIVEIRA, P.V.; TEIXEIRA, S.B.; SOUSA, C.P.; BACARIN, M.A.; MORAES, D.M. Atividade antioxidante e viabilidade de sementes de girassol após estresse hídrico e salino. **Revista Brasileira de Sementes**. v. 33, n.4, p. 752-761, 2011.

CRUSCIOL, C.A.C; SORATTO, R.P.; SILVA, L.M. da; LEMOS, L.B. Fontes e doses de nitrogênio para o feijoeiro em sucessão a gramíneas no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1545-1552, 2007.

CASTRO, D. G.; FERNANDES, M.C.N.; FELIX M. R.; CAZASSA, R. S.; TOMÉ, L. M.; BOTELHO, F. B. S. Estimativas de associação entre caracteres agronômicos na seleção de genótipos de arroz de terras altas. **Magistra**, v. 30, p. 359-367, 2019.

DIAZ, P. A. E.; BARON, N. C.; RIGOBELLO, E.C. *Bacillus spp.* as plant growth-promoting bacteria in cotton under greenhouse conditions. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 12, p. 2003-2014, 2019.

EMBRAPA. Primeira cultivar protegida do Brasil. **Embrapa notícias: pesquisa desenvolvimento e informação**. Brasília – DF. 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/48539204/embrapa-tem-a-primeira-cultivar-de-gergelim-protetida-do-brasil> . Acesso em 15 de fevereiro de 2023.

FALCONER, D.S. **Introdução à genética quantitativa**. Trad. De Silva, M. A. & Silva, J. L. Viçosa, UFV, Imprensa Universitária, 1987.

FLORES, C. ARBONA, V.; MORILLON, R.; CADENAS, A.G. Salinity and water deficit. In: **The genus citrus**. Woodhead Publishing, 2020. p. 291-309.

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

FAOSTAT. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Food and 2023 agriculture statistic data. Disponível em <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>> Acesso em 24 de janeiro de 2023.

FERREIRA, M.D.; SPRICIGO, P.C. Colorimetria - princípios e aplicações na agricultura. In: FERREIRA, M. D. (Ed.técnico). **Instrumentação pós-colheita em frutas e hortaliças**, São Carlos: Embrapa Instrumentação, p. 209-220, 2017.

GRILO J.; AZEVEDO P.V. Crescimento, desenvolvimento e produtividade do gergelim 'BRS Seda' na agrovila de Canudos, em Ceará Mirim (RN). **Revista Hols**, v. 2, p. 19-33, 2013.

GRATÃO, P.L. POLLE, A.; LEA, P. J.; AZEVEDO, R.A. making the life of heavy metal-stress plants a little easier. **Functional Plant Biology**, v.32, p. 481-494, 2005.

GAIERO, J. R.; McCALL, C. A.; THOMPSON, K. A.; DAY, N. J.; BEST, A. S.; DUNFIELD, K. E. Inside the root microbiome: bacterial root endophytes and plant growth promotion. **American journal of botany**, v.100 n. 9, p.1738-1750, 2013.

GARCIA, R.A; LOVAISA, N.C. Isolation and characterization of phosphate solubilizing bacteria in northwestern Argentina and its effect in promoting growth in maize (*Zea mays* L.). **Revista Agronómica del Noroeste Argentino**, v. 35, p. 13-28, 2015.

GOSWAMI, D., P, S.; PARMA, S.; VAGHELA, H.; DHANDHUKIA, P.; THAKKER, J. N. Describing *Paenibacillus mucilaginosus* strain N3 as an efficient plant growth promoting rhizobacteria (PGPR). **Cogent Food & Agriculture**, v. 1, n. 1, p.1-13, 2015.

GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Superoxide desmutases occurrence in higher plants. **Plant Physiology**. v. 59, p. 314-309, 1977.

GOMES, E. A.; LANA, U. G. de P.; ALVES, V. M. C.; PAIVA, C. A. de O.; GOLDINHO, B. T. V.; SOUZA, S. M. de. **Mecanismos das bactérias promotoras do crescimento de plantas na mitigação dos efeitos do déficit hídrico**. 2022. Disponível em <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1144322/1/DOC-267-Mecanismos-das-bacterias-promotoras-do-crescimento-de-plantas.pdf>> Acesso em 16 de fevereiro de 2023.

HANSEL, F. D.; RODRIGUES, M.; ZABINI, A.V; ZAVASCHI, E. **NUTRIÇÃO MINERAL COMO ALIADA DAS PLANTAS NA TOLERÂNCIA A ESTRESSES AMBIENTAIS**, 2021. Doi:[10.13140/RG.2.2.15306.08643](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15306.08643)

HIKA, G.; GELETA, N.; JALETA, Z. Genetic variability, heritability and genetic advance for the phenotypic traits in sesame (*Sesamum indicum* L.) populations from Ethiopia. **Science, Technology and Arts Research Journal**, v. 4, p. 20-26, 2015.

HASHEM, A. TABASSUM, B.; ALLAH, E. F. A. *Bacillus subtilis*: A plant-growth promoting rhizobacterium that also impacts biotic stress. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 26, n. 6, p. 1291-1297, 2019.

HAIBRU, G.; DASH, M.; PRADHAN, B.; LENKA D.; TRIPATHY S. K. Genetic parameters of variability and character association studies for yield and some capsule shattering traits in sesame germplasm. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 7, p. 585-590, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) – Censo Agropecuário. Sidra, 2023. Disponível em:
<<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6958#resultado>>

JÚNIOR, A. F. C.; JUNIOR, G. M. B.; LIMA, C. A.; MARTINS, A. L. L.; SOUZA, M. C.; CHAGAS, L. F. B. *Bacillus subtilis* como inoculante promotor de crescimento vegetal em soja. **Diversitas Journal**, v. 7, n.1, p. 0001-0016, 2022.

JÚNIOR, F. H. N.; GODIM, F. A.; FREITAS, V. S.; BRAGA, B. B.; BRITO, P. O. B. de; MARTINS, K. Crescimento foliar e atividades das enzimas antioxidativas em plântulas de girassol suplementadas com percolado de aterro sanitário submetidas a estresse hídrico. **Revista Ambiente & Água**, v. 12, p. 71-86, 2017.

KOUIGHAT, M., HANINE H.; CHETTO O; FAKHOUR S.; FECHTALI, M. E.; NABLOUSSI A. Assessment of Novel Genetic Diversity Induced by Mutagenesis and Estimation of Genetic Parameters in Sesame M4 Mutant Lines. **International Journal of Plant Biology**, v. 13, p. 644-662, 2022.

KOUR. D.; RANA, K. L.; KAUR, T.; YADAV, N.; YADAV, A. N. KUMAR, M.; KUMAR, V.; DHALIWAL, H.S.; SAXENA, A. K. Biodiversity, current developments and potential biotechnological applications of phosphorus-solubilizing and -mobilizing microbes: A review. **Pedosphere**, v. 31, p. 43-75, 2021.

KHOSA, S. A.; ERNILE, K. O.; KHAN, K.S. AKMAL, M. Phosphorus mineralization in response to organic and inorganic amendment in a semi-arid pasture soil. **Eurasian Journal of Soil Science**, v. 10, n. 1, p. 26-31, 2021.

KUMAR, A. E VERMA, J. P. Does plant—Microbe interaction confer stress tolerance in plants: A review? **Microbiological Research**, v. 207, p.41–52. 2018.

KHELIFA, A. B. et al. Sesame (*Sesamum indicum* L.) under drought: a review. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 1-15, 2019.

KANJANASOPA, D.; AIEDHET, W.; THITITHANAKUL, S.; Paungfoo-Lonhienne, C. Plant growth promoting rhizobacteria as biological control agent in rice. **Agricultural Sciences**, v. 12, n. 01, p. 1, 2021.

LICHTENTHALER, H.K. Chlorophylls and carotenoids: Pigmentos of photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzymology**. v. 148, p. 350-382, 1987.

LIMA, R. L. S.; BELTRÃO, N. E. M. **Gergelim**: o produtor pergunta, a embrapa responde. In: solo, calagem e adubação. 1. Ed. Brasília - Distrito Federal: Embrapainformação e tecnologia, 2009. p. 70-82.

LEITE, W. de S.; PAVAN, B.E.; FILHO, C. H. A. M.; FEITOSA, F. S.; OLIVEIRA C. B.D. Estimativas de parâmetros genéticos e correlações entre caracteres agronômicos em genótipos de soja. **Nativa**, v. 3, n. 4, p. 241-245, 2015.

LIMA, B. F. S.; ALMEIDA, T.T; OLIVEIRA, A. dos S.; MACHADO, G. L. Qualidade fisiológica de sementes de gergelim em função do equilíbrio higroscópico em diferentes saís. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 17, n. 1, p. 18-22, 2021.

LIMA, B.C.; MORO, A. L; SANTOS, A. C. P.; BONIFACIO, A.; ARAÚJO, A. S. F.; ARAÚJO, F. F. de. *Bacillus subtilis* ameliorates water stress tolerance in maize and common bean. **Journal of Plant Interactions**, v.14, n.1, p. 432- 439, 2019.

LIMA, G. B. P. de.; GOMES, E. F.; ROCHA, G. M. G. da.; SILVA, F. de A.; FERNANDES, P. D.; MACHADO, A. P.; JÚNIOR, P. I. F.; MELO, A. S. de.; ARRIEL, N. H. C.; GONDIM, T. M. de S; LIMA, L. M. de. *Bacilli* Rhizobacteria as Biostimulants of Growth and Production of Sesame Cultivars under Water Deficit. **Plants**, v. 12, n. 6, p. 1337, 2023.

MAGALHÃES, I. D.; COSTA, F. E.; ALVES, G. M. R.; ALMEIDA, A. E. da S.; SILVA, S. D. da; SOARES, C. S. Produção de gergelim orgânico sob condições semiáridas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA, 4.; SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE OLEAGINOSAS ENERGÉTICAS, 1., 2010, João Pessoa. Inclusão social e energia: **anais**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2010. Disponível em <
<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/856758/1/FER29.pdf>>

MONTILLET, J.L.; RONDET D.; BRUGIERE, S.; HENRI, P.; RUMEAU, D.; REICHHELD, J. P.; COUTÉ, Y.; LEONHARDT, N., REY, P. Plastidial and cytosolic thiol reductases participate in the control of stomatal functioning. **Plant, Cell & Environment**, v. 44, n.5, p.14171435, 2021.

MEKURIAW, S. A. **Genetic Divergence and Correlation Study in Sesame (*Sesamum indicum* L.) Genotypes**. Disponível em
<file:///C:/Users/Camila%20Lima/Downloads/Sileshi%20Andualem.pdf>

MAIA, J.M.; SILVA, S. L. F.; VOIGT, E. L. et al. Atividade de enzimas antioxidantes e inibição do crescimento radicular de feijão caupi sob diferentes níveis de salinidade. **Acta Botanica Brasilica**, v. 26, p. 342-349, 2012.

MARIANO, R. de L. R.; SILVEIRA, E. B. da.; ASSIS, S. M. P de; GOMES, A. M. A.; NASCIMENTO, A. R. P.; DONATO, V. M. T. S. Importância de bactérias promotoras de

crescimento e de biocontrole de doenças de plantas para uma agricultura sustentável. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica**, v. 1, p. 89-111, 2004.

MELO, I. s. de. Endófitos. **Portal embrapa**. 22 de dezembro de 2021. Disponível em <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agricultura-e-meio-ambiente/manejo/recursos-geneticos/endofiticos> acesso em 18 de fevereiro de 2023.

MILANI, R. de M. **Diversidade de bactérias epífitas e endofíticas da cultura do milho**. Jaboticabal, 2017. 60 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias e Veterinária) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual de Paulista.

MESQUITA, J. B. R. de.; AZEVEDO, B. M. de.; CAMPELO, A. R.; FERNANDES, C. N. V.; VIANA, T. V. A. Crescimento e produtividade da cultura do gergelim (*Sesamum indicum* L.) sob diferentes níveis de irrigação. **Irriga**, v. 18, n. 2, p. 364-375, 2013.

MILLER, G.; SUZUKI, N.; ÇİFTÇI-YILMAZ, S.; MITTLER, R. Reactive oxygen species homeostasis and signalling during drought and salinity stresses. **Plant, Cell & Environment**, v. 33, p. 453-467, 2010.

NAKANO, Y. E ASADA, K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate specific peroxidase in spinach chloroplasts. **Plant Cell Physiol.**, v.22, n.1p.867-880, 1981.

NOGUEIRA, A. R. de.; SOUZA, G. B. de. **Manual de laboratórios: Solo, Água, Nutrição vegetal, Nutrição Animal e Alimentos**. São Carlos – SP. Ed. Embrapa, novembro de 2005.

NOVO, L. A. B.; CASTRO, P. M. L.; SILVA, E. F. de. Plant growth-promoting rhizobacteria-assisted phytoremediation of mine soils. **Bio-geotechnologies for Mine Site Rehabilitation**. Elsevier. 16, 281–295. DOI: 10.1016/B978-0-12-812986-9.00016-6 (2018).

OLIVEIRA, A. R. de; ARRIEL, N. H. C. As principais oleaginosas da agricultura familiar. In: MELO, R. F de; VOLTOLINI, T. V. (Org.). **Agricultura familiar dependente de chuva no semiárido**. Brasília – DF: Embrapa, 2019. p. 86 – 128.

PATHACK, N. RAI, A. K.; KUMARI, R. TRAPA, A.; BHAT, V. Sesame Crop: An underexploited Oilseed Holds Tremendous Potential for Enhanced Food Value. **Agriculture Sciences**, v. 5, p. 519-529, 2014.

PERIN, A.; CRUVINEL, D. J.; SILVA, J. W. da. Desempenho do gergelim em função da adubação NPK e do nível de fertilidade do solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n.1, p. 93-98, 2010.

PES, L. Z. E ARENHARDT, H.M. **FISIOLOGIA VEGETAL**. Santa MARIA-RS: Rede e-Tec Brasil, 2015.

PATIL, M. K.; LOKESHA, R. Estimation of Genetic Variability, Heritability, Genetic Advance, Correlations and Path Analysis in Advanced Mutant Breeding Lines of Sesame (*Sesamum indicum* L.), **Journal of Pharmacognosy & Natural Products**, v. 4, p. 1-5, 2018.

PIMENTEL C. Funções da água. In: A relação da planta com a água (ed. by Pimentel C), pp. 48-57. Edur, Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil.

PORTO, E. M. V.; TEIXEIRA, F. A.; FRIES, D. D.; JARDIM, R. R.; AMARO, H. T. R.; FILHO, J. R. dos S.; SANTOS, J. P. dos; JESUS, F. M. de; SILVA, H. S.; VIEIRA, T. M. Microrganismos promotores de crescimento de plantas como mitigadores do estresse hídrico em pastagens: uma revisão narrativa. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 11, p. e514111134029, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i11.34029>.

PANIGRAHI, S.; MOHANTY, S.; RATH, C. C. Characterization of endophytic bacteria *Enterobacter cloacae* MG00145 isolated from *Ocimum sanctum* with Indole Acetic Acid (IAA) production and plant growth promoting capabilities against selected crops. **South African Journal of Botany**, v.134, p.1726, 2019.

PAULILO, M. T. S. **Fisiologia vegetal**. CED/LANTEC/UFSC, 2010.

PÉREZ-MONTAÑO, F.; VIILEGAS, C. A.; BELLOGIN, R. A.; CERRO, P. D.; ESPUNY, M. R.; GUERRERO, I. J.; BAENA, F. J. L.; OLLERO, F.J.; CUBO T. Plant growth promotion in cereal and leguminous agricultural important plants: from microorganism capacities to crop production. **Microbiological Research**. v. 169, p. 325 – 336, 2014.

PANDEY, B. B.; RATNAKUMAR, P.; KIRAN, U.; DUDHE, M. Y.; LAKSHMI, G. S.; RAMESH, K.; GUHEY, A. Identifying traits associated with terminal drought tolerance in sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes. **Frontiers in Plant Science**, v. 12 p. 27-79, 2021.

QUEIROGA, V.P.; GONDIM, T.M.S.; VALE, D.G.; PE. GEREON, H.G.M.; MOURA, J.A.; SILVA, P.J.; SOUZA FILHO, J.F. **Produção de Gergelim Orgânico nas Comunidades de Produtores Familiares de São Francisco De Assis Do Piauí**. EMBRAPA-CNPA, Campina Grande, 2008. 127p. (Documentos, 190)

RAMALHO, M. A. P.; SANTOS, J. B. dos; PINTO, C. A. B. P.; SOUZA, E. A. de; GONÇALVES, F. M. A.; SOUZA, J. C. de. **Genética na Agropecuária**. Lavras. Ed. UFLA, 5ª Ed. 2012.

RIBEIRO, V.H. de A; QUEIROZ, M. F. de.; ARRIEL, N. H. C.; SILVA, V. M. de A.; FERNANDES, P. D. **Análise de genótipos de gergelim BRS seda e preta sob diferentes níveis de fertirrigação com solução organomineral**. 1ª edição. Campina grande: Portal tecnológico, 2021.

STREIT, N. M.; CANTERLE, L. P.; CANTO, M. W. do.; HECKTHEUER, L.H.H. As clorofilas. **Ciência Rural**, v. 35, p. 748-755, 2005.

SILVA, M. A; SANTOS, C. M.; VITORINO, H. S.; RHEIN, A. L. F. Pigmentos fotossintéticos e índice SPAD como descritores de intensidade do estresse por deficiência hídrica em cana-de-açúcar. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 1, p. 173-181, 2014.

SHARMA, P. JHA, A. B.; DUBEY, R. S.; PESSARAKLI, M. Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. **Journal of Botany**, v.12, n.1, p.1-26, 2012.

- SOUZA, R. F. de.; FAQUIN, V.; ANDRADE, A. T. de.; TORRES, P.R.F. Formas de fósforo em solos sob influência da calagem e adubação orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1535-1544, 2007.
- SILVA, J. A. G.; SCHWERTNER, D. V.; CARBONERA, R.; BIANCHI, C. Distância genética em genótipos de girassol. **Current Agricultural Science and Technology**, v. 17, n. 3, 2011.
- SILVA, E. L. G.; GONÇALVES, S. B.; FILHO, A. F. M.; ARRIEL, N. H. C.; QUEIROZ, M. F. Crescimento e produção do gergelim em diferentes níveis de solução organomineral. **Revista Verde**, v. 11, n.3, p.33-38, 2016.
- SHEHAB, G. G.; AHMED, O. K.; EL-BELTAGI, H. S. Effects of Various Chemical Agents for Alleviation of Drought stress in rice plants (*Oryza sativa* L.). **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**, v. 38, p. 139-148, 2010.
- SAPUCAY, M. J. L. da C.; FERREIRA, A. S.; OLIVEIRA, A. L. M. de.; ZUCARELI, C. Rizobactérias em pós-emergência e adubação nitrogenada de cobertura no desempenho agrônômico do milho. **MAGISTRA**, v. 31, p. 653-660, 2020.
- TAIZ, L. E ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed. 954 p. 2013.
- TEKLU, D.H.; KEBEDE, S.A.; GEBREMICHAEL, D.E. Assessment of genetic variability, genetic advance, correlation and path analysis for morphological traits in sesame genotypes. **Asian Journal of Agricultural Research**, v. 8, p. 181–194, 2014.
- TAIZ, L.; ZEIGER. E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6ª Ed. Porto Alegre: Artmed, 858 p, 2017.
- TURATTO, M. F; DOURADO, F. dos S.; ZILLI, J. E.; BOTELHO, G. R. Control potencial of *Meloidogyne javanica* and *Ditylenchus spp.* usando *Pseudomonas* fluorescentes e *Bacillus spp.* **Brazilian Journal of Microbiology**, v.49 n.1, p.5458, 2018.
- TEODORO, P. E.; RIBEIRO, L. P.; OLIVEIRA, E.P.de.; CORRÊA, C. C. G.; TORRES, F. E. Acúmulo de massa seca na soja em resposta a aplicação foliar com silício sob condições de déficit hídrico. **Bioscience Journal**, v. 31, n.1 p. 161-170, 2015.
- VENCOVSKY, R; BARRIGA, P. Genética biométrica no fitomelhoramento. São Paulo: Sociedade Brasileira de Genética, 1992. 496p.
- VINCENT, J.M. A manual for the practical study of nodule bacteria. **Blackwell Science Publication**, Oxford. 1970.
- YOUSEFZADEH-NAJAFABADI, M. e EHSANZADEH, P. Photosynthetic and antioxidative upregulation in drought-stressed sesame (*Sesamum indicum* L.) subjected to foliarapplied salicylic acid. **Photosynthetica**, v. 4, p. 611–622, 2017.
- ZENAWI, G. e MIZAN, A. Effect of nitrogen fertilization on the growth and seed yield of sesame (*Sesamum indicum* L.). **International Journal of Agronomy**, v. 2019, ID 5027254, p. 1-7, 2019.