



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE ENGENHARIA AGRONÔMICA



JOÃO HENRIQUE RISTOW DA SILVEIRA

**DESEMPENHO PRODUTIVO DO SORGO CULTIVADO SOB DÉFICIT
HÍDRICO E INOCULADO COM *Priestia aryabattai***

**ARARAS/SP
DEZEMBRO/2025**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE ENGENHARIA AGRONÔMICA



JOÃO HENRIQUE RISTOW DA SILVEIRA

**DESEMPENHO PRODUTIVO DO SORGO CULTIVADO SOB DÉFICIT
HÍDRICO E INOCULADO COM *Priestia aryabattai***

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia
Agrônômica – CCA – UFSCar para a obtenção do
título de Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Ferreira da Silva

**ARARAS/SP
DEZEMBRO/2025**

AGRADECIMENTOS

Em uma bela jornada, concluo meu Trabalho Final de Graduação. Em meio a imensa dedicação e empenho que destinei ao projeto, não posso deixar de mencionar a minha gratidão a algumas partes que foram fundamentais para a caminhada. A princípio, gostaria de realçar o meu agradecimento a Deus, que sempre me guiou para as melhores decisões nos momentos mais difíceis, e, para que, naqueles de maior glória, eu tivesse a sabedoria nas minhas decisões, que seriam impossíveis sem a fé.

Em seguimento de gratidão a mais uma parte que se porta como alicerce na minha vida, agradeço imensamente a meus pais, Fernando Werlang da Silveira e Ana Paula Ristow da Silveira, que sempre me garantiram todo o suporte necessário para que eu construísse a minha caminhada, com independência, muita responsabilidade e juízo, como já diria a minha mãe. Apesar de muitos momentos de saudade pela distância, o ininterrupto apoio de vocês permitiu que eu me fizesse em casa mesmo tão longe. É uma menção honrosa aos meus irmãos e avós que sempre se fizeram presentes.

Ao meu suporte mais próximo, agradeço imensamente a minha namorada, Sophia Bazan Palioto Antonio, que esteve comigo sem medir esforços em cada momento da minha trajetória. Obrigado meu amor, pela parceria, compaixão, conselhos, conversas e dedicação para sempre me ajudar e me entender quando foi preciso, mesmo quando nem eu me entendia (e foram vários os momentos). Te amo muito!

Àquele que foi, dentre as ajudas que recebi, um dos mais significantes, agradeço ao meu grupo de estudos GEPAGRI (Grupo de Estudos e Pesquisas em Agricultura), e a todos os membros que foram essenciais ao longo do projeto, no suporte técnico para tomadas de decisão e interpretações, bem como o árduo trabalho manual que tivemos.

Em uma menção especial, destaco meu orientador Prof. Dr. Gustavo Ferreira da Silva, uma pessoa excepcional que conheci e pude ser orientado, e que agradeço muito por ter entrado na Universidade antes que eu sáísse. Sou muito grato por todo apoio incondicional ao longo de todo o projeto, buscando sempre sanar todas as minhas dúvidas (que foram muitas), mas sempre aberto a ouvir e conversar sobre as minhas sugestões e soluções. Parabéns pelo seu trabalho professor, é gratificante trabalhar com pessoas como você.

Agradeço também a Profa. Dra. Juliana Joice Pereira Lima, por gentilmente aceitar meu convite para compor parte da banca avaliadora deste trabalho, e por, juntamente ao GEPAGRI, me auxiliar em tantos momentos de minha caminhada. Ainda como parte da banca do Trabalho Final de Graduação, obrigado a Profa. Dra. Anastácia Fontanetti, a qual admiro pelo trabalho e

trocas de conhecimento, por educadamente aceitar fazer parte deste momento tão especial para mim.

Agradeço aos meus amigos que se fizeram presentes em toda a minha trajetória acadêmica desde os primeiros momentos aqui em Araras, e que tornaram muito mais fácil todo esse período da minha vida. Sem o suporte de vocês certamente teria sido muito mais difícil, obrigado pelos momentos de descontração, risadas, festas, conselhos e pela amizade. Menção especial ao Paulo, Ernani, João M. e Lucas.

À instituição Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) – campus Araras, meus grandes agradecimentos pela contribuição nesta etapa tão importante e mais feliz da minha vida em que estou completando minha formação acadêmica. Deixarei a Universidade com certeza como uma pessoa muito melhor, e um profissional que buscará sempre a excelência e ser referência.

Em especial menção ao Prof. Dr. Rodrigo Gazaffi, um agradecimento pela disponibilização da estrutura de casa de vegetação utilizada para realização do projeto, espaço que foi crucial e aproveitado como base para a implementação e andamento do experimento. Como participação especial no projeto, à equipe do grupo de estudos NEPAS, do professor doutor Vítor Forti, um agradecimento especial pela parceria e disponibilização de estrutura e espaço, para realização de análises obtendo maior qualidade de resultados.

O presente trabalho foi realizado com apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq.

Como reflexão particular, gostaria de deixar uma frase que penso constantemente: entenda e valorize o momento. Devemos entender que o momento é apenas um reflexo da perspectiva que adotamos para enxergar a vida, podendo se referir ao momento de saúde, momento financeiro, momento emocional. Mas, mesmo que rotineiramente enfrentemos diversos momentos, precisamos vive-los e valorizá-los incessantemente, pois todo momento é particular e finito, seja bom ou ruim. Assim, conseguimos superar obstáculos que muitas vezes impomos sobre nós mesmos, e apenas entendendo, valorizando e VIVENDO o momento, conseguimos superar!

RESUMO

O sorgo granífero [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] tem grande potencial para cultivo no Brasil, por ser considerado uma cultura rústica, normalmente cultivado em áreas marginais, fora da época ideal de semeadura e com pouca disponibilidade hídrica. Apesar de ser uma cultura tolerante ao déficit hídrico, a falta de água pode afetar o desempenho produtivo desta cultura. Neste cenário, é necessário buscar alternativas sustentáveis para reduzir os impactos do déficit hídrico, sem aumentar os custos de produção. Neste contexto, o uso de bioinsumos a base de *Priestia aryabhatai* podem reduzir os efeitos do estresse hídrico nas culturas agrícolas. No entanto, ainda não há estudos com sorgo. O objetivo com esse trabalho foi avaliar o desempenho produtivo do sorgo em função da inoculação ou coinoculação com *P. aryabhatai* sob diferentes regimes hídricos. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento em blocos casualizados, esquema fatorial 3×3 , com cinco repetições. Os fatores foram: manejo do bioinsumo (inoculação via semente, inoculação via semente + coinoculação no florescimento e testemunha) e irrigação (85%, 50% e 30% da capacidade de água disponível – CAD). Os resultados demonstraram que, sob déficit moderado (50% CAD), a inoculação e coinoculação proporcionaram acréscimo de 11,6% na massa úmida em relação à testemunha. Em condição de déficit severo (30% CAD), a coinoculação promoveu aumentos de 17,5% na massa úmida e de 15,1% na massa seca, em comparação à testemunha. Quanto ao desenvolvimento radicular, a coinoculação resultou em maior massa seca de raiz tanto na ausência de déficit quanto sob estresse severo. A coinoculação também aumentou o número de grãos por planta (37%, 28% e 81% nos regimes de 85%, 50% e 30% CAD, respectivamente), além da massa de mil grãos e produção, com incremento de até 66% em condições sem déficit e até 81% sob déficit severo. Conclui-se que a coinoculação com *P. aryabhatai* é eficiente para mitigar os efeitos da escassez hídrica, aumentando a resiliência e a produtividade do sorgo.

Palavras-chaves: Estresse hídrico, manejo da irrigação, *Priestia aryabhatai*; *Sorghum bicolor* (L.) Moench.

ABSTRACT

Grain sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] has great potential for cultivation in Brazil, as it is considered a hardy crop, usually grown in marginal areas, outside the ideal sowing season and under low water availability. Although it is tolerant to water deficit, insufficient water can negatively affect its productive performance. In this scenario, it is necessary to seek sustainable alternatives to mitigate the impacts of water deficit without increasing production costs. In this context, the use of bio-inputs based on *Priestia aryabhatai* may reduce the effects of water stress on agricultural crops. However, studies involving sorghum are still scarce. The objective of this study was to evaluate the productive performance of sorghum as a function of inoculation or co-inoculation with *P. aryabhatai* under different water regimes. The experiment was conducted in a greenhouse using a randomized block design, arranged in a 3 × 3 factorial scheme, with five replications. The factors evaluated were bio-input management (seed inoculation, seed inoculation combined with co-inoculation at flowering, and a non-inoculated control) and irrigation levels (85%, 50%, and 30% of available water capacity – AWC). The results showed that under moderate water deficit (50% AWC), inoculation and co-inoculation promoted an 11.6% increase in fresh mass compared to the control. Under severe water deficit (30% AWC), co-inoculation resulted in increases of 17.5% in fresh mass and 15.1% in dry mass relative to the control. Regarding root development, co-inoculation led to higher root dry mass both under non-deficit conditions and under severe water stress. Co-inoculation also increased the number of grains per plant by 37%, 28%, and 81% under the 85%, 50%, and 30% AWC regimes, respectively, in addition to increasing thousand-grain weight and grain yield, with gains of up to 66% under non-deficit conditions and up to 81% under severe deficit. It is concluded that co-inoculation with *P. aryabhatai* is effective in mitigating the effects of water scarcity, thereby increasing sorghum resilience and productivity.

Keywords: Water stress, irrigation management, *Priestia aryabhatai*, *Sorghum bicolor* (L.) Moench.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1. Sorgo	8
2.2. Déficit hídrico na cultura do sorgo	10
2.3. Bioinsumos na agricultura brasileira	12
2.3.1. <i>Priestia aryabhatai</i>	13
3. OBJETIVOS	14
3.1. Objetivo geral	14
3.2. Objetivos específicos	15
4. MATERIAL E MÉTODOS	15
4.1. Localização	15
4.2. Delineamento experimental e condução do experimento	16
4.3. Avaliações	18
4.3.1. Produção de biomassa	18
4.3.2. Desenvolvimento da parte aérea da planta, componentes de produção e produção de grãos	18
4.3.3. Desenvolvimento radicular	18
4.3.4. Produtividade da água da irrigação	19
4.4. Análise estatística	19
5. RESULTADOS	19
5.1. Análise multivariada dos dados	25
6. DISCUSSÃO	28
7. CONCLUSÃO	32
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

1. INTRODUÇÃO

A cultura do sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] vem ganhando cada vez mais destaque na agricultura brasileira, com potencial de substituição em parte do milho na formulação das rações animal, e demais usos da cultura, como produção de etanol e biodiesel. O cultivo no Brasil ainda não é tão expressivo, no entanto, tem demonstrado alto potencial para produção de grãos e de biomassa, com excelente desempenho no cultivo de entressafra (referenciar). Na última década apresentou aumento superior a 2 e 2,5 vezes na área plantada e na produção, respectivamente. Sendo a região Sudeste responsável por aproximadamente 32% da área plantada e 37% da produção brasileira (CONAB, 2024).

Apesar de sua importância agrônômica e crescente expansão no Brasil, a cultura do sorgo ainda apresenta lacunas científicas relevantes, especialmente no que se refere à avaliação do uso de bioinsumos e as BPCP (bactérias promotoras do crescimento de plantas) sob condições de estresse abiótico, como o déficit hídrico, quando comparada a culturas amplamente estudadas, como o milho e a soja (Mendoza-Labrador et al., 2021; Deng et al., 2022).

Apesar de seu potencial produtivo, estimado em até 12 t ha⁻¹ em condições ideais de manejo, a produtividade média brasileira do sorgo ainda se mantém em torno de 3 t ha⁻¹, reflexo, principalmente, do cultivo em áreas marginais, da limitação hídrica e da adoção de níveis tecnológicos reduzidos (Borghini et al., 2014; Conab, 2024).

Nos últimos anos tem-se observado cada vez mais e com maior frequência a ocorrência de épocas de seca em diferentes regiões do planeta, ocasionadas em grande parte pelos efeitos das mudanças climáticas, que alteram o ciclo hidrológico como um todo (Gitz et al., 2016). Tais períodos de estiagem afetam negativamente a produção agrícola, já que o pleno desenvolvimento das plantas depende do adequado suprimento de água durante os diferentes estádios fenológicos da planta (Fraire-Velazquez e Balderas-Hernández, 2013).

Diante desse cenário, torna-se necessário o desenvolvimento e a adoção de alternativas viáveis e sustentáveis que contribuam para a mitigação dos efeitos do déficit hídrico sobre a produção agrícola, seja na produtividade ou qualidade nutricional e física, especialmente por meio de práticas que não elevem significativamente os custos de produção e que promovam maior eficiência no uso dos recursos naturais. Recentemente, a agricultura moderna tem buscado por tecnologias consideradas “*eco-friendly*”, as quais aumentam a produtividade sem prejuízos para o meio ambiente (Surendran, Sandeep e Joseph, 2016). Uma destas tecnologias é o uso de rizobactérias, capazes de estimular o crescimento de raízes e, dessa forma, ampliar a

capacidade da planta em explorar maior volume de solo, acessar a água armazenada e assim tolerar períodos de escassez hídrica (Buitrago et al., 2021).

Contudo, ainda são escassas pesquisas com rizobactérias, na cultura do sorgo. Estudos prévios mostram que bactérias do gênero *Priestia*, em especial a *P. aryabhatai*, têm potencial de amenizar os danos provocados por períodos de seca a diversas culturas, como o milho (Deng et al., 2022; Moreno-Galvan et al., 2020), gramíneas forrageiras (Mendoza-Labrador et al., 2021) e soja (Park et al., 2017).

A coinoculação de microrganismos consiste em uma estratégia agronômica baseada na aplicação conjunta de dois ou mais microrganismos benéficos, com o objetivo de potencializar as interações positivas entre plantas e a microbiota associada. Essa prática busca reintroduzir ou complementar comunidades microbianas no ambiente radicular, normalmente por meio de uma calda contendo diferentes inoculantes ou produtos biológicos, visando melhorar o crescimento vegetal, a nutrição e a tolerância a estresses (DRESSLER et al., 2025). No entanto, a eficiência da coinoculação depende da compatibilidade entre os microrganismos utilizados, das condições ambientais e do momento de aplicação, sendo fundamental a realização de estudos específicos que avaliem seus efeitos em cada sistema produtivo.

Priestia aryabhatai atua por múltiplos mecanismos associados à promoção do crescimento vegetal, incluindo a síntese de fitormônios, a solubilização de nutrientes, a produção de exopolissacarídeos e a indução de respostas antioxidantes, contribuindo para a manutenção da homeostase hídrica e a mitigação do estresse abiótico em diferentes culturas agrícolas (Park et al., 2017; Deng et al., 2022). Rizobactérias promotoras de crescimento vegetal (PGPR) como *P. aryabhatai* têm sido amplamente estudadas por sua capacidade de estimular o desenvolvimento do sistema radicular, aumentar a eficiência no uso da água e induzir respostas fisiológicas associadas à tolerância ao estresse hídrico, como a produção de fitormônios, osmólitos e enzimas antioxidantes (Buitrago et al., 2021; Kim et al., 2021).

Diante do contexto apresentado, este trabalho parte da hipótese de que a inoculação e/ou coinoculação com *P. aryabhatai* contribui para mitigar os efeitos adversos do déficit hídrico em plantas de sorgo. Dessa forma, espera-se que as plantas inoculadas ou coinoculadas apresentem maior capacidade de explorar o solo, manter a homeostase hídrica em períodos de estiagem e, como consequência, expressem incrementos na produção de grãos e biomassa em comparação ao cultivo sem inoculação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Sorgo

O sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] apresenta importante relevância agronômica, caracterizada por sua elevada adaptabilidade a condições adversas, especialmente em ambientes com restrição hídrica. A espécie é tropical de dias curtos, da família das Poaceae, e com boa amplitude térmica de temperatura ótima para o cultivo, além da tolerância ao estresse hídrico, é amplamente difundido pelo Brasil (Tabosa et al., 2002; Monteiro et al., 2004; Ávila, 2022).

Tradicionalmente utilizado para produção de grãos, forragem, biomassa e produção de bioetanol, o sorgo destaca-se por seu ciclo relativamente curto, eficiência no uso da água e resistência ao calor, atributos que o tornam uma cultura estratégica em regiões semiáridas e subúmidas. Historicamente, o cultivo do sorgo no Brasil esteve associado a áreas consideradas marginais, em função de sua maior tolerância a estresses abióticos e do menor custo de produção quando comparado a culturas como o milho. Essa estratégia produtiva foi adotada por produtores como alternativa para redução de riscos climáticos, sobretudo em sistemas de segunda safra e regiões com maior variabilidade hídrica (Devnarain et al., 2016). Além disso, exploram o potencial de desempenho nestas condições mais adversas, em que a cultura tende a responder mesmo sob estresses, compensado também pela ampla margem de aproveitamento da cultura na comercialização, devido a diversidade de usos, principalmente na alimentação animal (Borghi et al., 2014).

A mecanização completa da cultura também auxiliou a expansão da cultura no país, utilizando equipamentos convencionais para semeadura, cultivo e colheita, a espécie se encaixa aos moldes perfeitos frente aqueles manejos realizados em outras culturas anuais, compartilhando características como espaçamento, barra de corte de colheita e armazenagem. Dessa forma, há uma contribuição para sua viabilidade econômica em diferentes sistemas produtivos, variados fins comerciais e cultivares adaptadas a diversas regiões e solos do país, em que a produção da cultura pode ocupar uma posição de relevância na rotação (Von Pinho et al., 2022).

Devido a vasta empregabilidade da cultura frente a finalidade de utilização da produção, há uma variação da duração do ciclo da cultura e da época de cultivo, a depender da localização de implantação e o objetivo produtivo da cultivar, podendo variar entre 90 a 120 dias, como o sorgo granífero, ou até se estender a períodos de 150 dias como o sorgo biomassa que tem elevado porte, além da diversidade de épocas de semeadura: primavera, outono como segunda safra e inverno (Borém; Pimentel; Parrella, 2014).

De modo geral, o ciclo curto e as características agronômicas do sorgo permitem sua inserção em diferentes sistemas agrícolas, desde áreas com boa disponibilidade hídrica até sistemas mais restritivos, nos quais a cultura pode ser utilizada como alternativa produtiva ou

como cultura de cobertura. O uso de diferentes grupos e cultivares possibilita a adaptação do sorgo às condições do sistema produtivo, inclusive sob estresse hídrico. Além disso, a cultura apresenta elevado potencial para integração em sistemas de rotação, especialmente com a soja, contribuindo para a cobertura do solo, formação de palhada, rentabilidade e melhoria do desempenho da cultura subsequente em sistemas bem manejados de rotação e plantio direto (Silva et al., 2024).

A capacidade de adaptação da cultura e o uso em sistemas de cultivos suscetíveis a condições adversas partem da ecofisiologia do sorgo, que revela características xerofíticas, incluindo cutícula espessa, estômatos regulados e sistema radicular profundo, que favorecem a tolerância ao estresse hídrico e mantêm a produtividade mesmo em condições de déficit (Embrapa, 2020). Quanto as raízes profundas, características específicas presentes como o volume de pelos absorventes, presença de sílica na endoderme e lignificação nos pedicelos são diferenciais que conferem as tolerâncias da cultura a períodos de adversidade (Singh et al., 2010). As folhas do sorgo são anfiestomáticas, apresentando estômatos em ambas as faces, ademais, podem apresentar substância cerosa na junção da bainha com o limbo foliar e, na face adaxial (superior), células buliformes, que são características da espécie e permanecem cheias de água, atuando como células motoras, favorecendo o enrolamento foliar e diminuindo a área transpiratória (Karumanchi et al. 2023).

Aspectos como os citados sobre a cultura e outras questões envolvendo os próximos tópicos como o déficit hídrico ressaltam a importância dos manejos agrônômicos integrados, incluindo o uso de promotores de crescimento e práticas conservacionistas, que potencializam o desenvolvimento e rendimento do sorgo sob diferentes condições ambientais. Por conseguinte, é válido o reconhecimento de que a cultura do sorgo responde efetivamente frente a condições adversas, nessa questão é importante a busca por práticas que minimizem os danos de estresses como o déficit hídrico, que possam maximizar os ganhos da cultura, em função de um melhor rendimento por área. A adoção de estratégias integradas, como a rotação de culturas e o uso de tecnologias biológicas, pode ampliar o desempenho produtivo da cultura, mesmo em cenários de crescente instabilidade climática (Silva et al., 2024).

2.2. Déficit hídrico na cultura do sorgo

As mudanças climáticas têm intensificado a crise hídrica no Brasil, com previsões que apontam para um cenário de menor disponibilidade de água e aumento da frequência e duração dos períodos de seca em várias regiões do país, preocupação que vem assolando produtores de diversas regiões ao longo dos anos. Projeções indicam que até 2050 o Brasil enfrentará, em

média, 12 dias de racionamento de água por ano, chegando a mais de 30 dias em regiões como o Nordeste e Centro-Oeste, período que pode ser expandido no semiárido, aumentando o risco de desertificação (Freitas e Magnabosco, 2025). A temperatura máxima média nas cidades brasileiras deve subir cerca de 1°C e a mínima 0,47°C, acompanhada de uma redução nos dias de chuva, o que limita a reposição dos mananciais (ANA, 2024).

Esses fatores têm implicações diretas para a produção agrícola, ocasionando perdas que impactam diretamente no rendimento das culturas e desempenho produtivo. Além disso, é importante salientar a necessidade de investimentos como a irrigação para atendimento das necessidades em tempos de veranico, por exemplo, efetivando a deficiência por água como um dos principais fatores na redução de produtividades (Zhang et al., 2016).

O déficit hídrico caracteriza-se pela condição em que a disponibilidade de água no solo é insuficiente para atender às demandas fisiológicas da planta, resultando em alterações metabólicas, morfológicas e bioquímicas que afetam o crescimento e a produtividade das culturas. Esse estresse pode ocorrer em diferentes intensidades e estágios fenológicos, sendo influenciado por fatores climáticos, edáficos e de manejo agrícola (Taiz et al., 2017).

Embora o déficit hídrico possa comprometer o desenvolvimento da cultura do sorgo em diferentes fases do ciclo, os estádios de emergência, florescimento e enchimento de grãos são considerados os mais sensíveis à restrição de água, uma vez que o estresse nesses períodos resulta em reduções significativas no número de grãos, no peso final e, conseqüentemente, na produtividade (Assefa et al., 2010; Prasad et al., 2008).

O déficit hídrico exerce impactos diretos na fisiologia e morfologia das plantas, limitando o desenvolvimento e a produtividade. Em situações de restrição súbita de água, ocorre fechamento estomático para conservar água, com conseqüente diminuição da fotossíntese e do potencial hídrico foliar, resultando em perda de turgor e redução na expansão celular. Essas respostas determinam um comprometimento do crescimento e menores rendimentos agrícolas (Souza et al., 2025).

A cultura do sorgo, embora adaptada a condições semiáridas devido a seu sistema radicular profundo e mecanismos fisiológicos de tolerância, é sensível à falta prolongada de água, sofrendo reduções significativas na biomassa, no crescimento foliar e no desempenho produtivo, sobretudo na produção de grãos. Em períodos críticos de déficit hídrico, as trocas gasosas e a fotossíntese são prejudicadas, levando a perdas produtivas que podem alcançar até 25% em cultivares convencionais (Abreha et al., 2022; Assefa et al., 2010; Brunini et al., 1998).

Apesar disso, o sorgo pode ativar mecanismos adaptativos importantes, como aumento da eficiência no uso da água, modificação da arquitetura foliar para minimizar perdas hídricas,

e maior exploração do solo por raízes profundas (Santos e Carlesso, 1998). Essas adaptações conferem melhor estabilidade do potencial hídrico e tolerância ao estresse, possibilitando a recuperação rápida do crescimento após o retorno das condições normais de água (Abreha et al., 2022; Assefa et al., 2010).

Finalmente, compreender o impacto das mudanças climáticas e do déficit hídrico sobre o sorgo tem motivado buscas por estratégias integradas de manejo, envolvendo seleção genética, práticas agronômicas sustentáveis e aplicação de bioinsumos que possam promover aspectos de mitigação dos estresses as plantas. Essas ações são essenciais para mitigar perdas e garantir a segurança produtiva em ambientes afetados por escassez de água (Abreha et al., 2022; Assefa et al., 2010).

2.3. Bioinsumos na agricultura brasileira

Referente à lei Nº 15.070 de 2024, que dispõe sobre os bioinsumos no Brasil, bioinsumos são todos aqueles produtos, processos ou tecnologias de origem vegetal, animal ou microbiana, incluído o oriundo de processo biotecnológico, ou estruturalmente similar e funcionalmente idêntico ao de origem natural, destinado ao uso na produção, na proteção, no armazenamento e no beneficiamento de produtos agropecuários ou nos sistemas de produção aquáticos ou de florestas plantadas, que interfira no crescimento, no desenvolvimento e no mecanismo de resposta de animais, de plantas, de microrganismos, do solo e de substâncias derivadas e que interaja com os produtos e os processos físico-químicos e biológicos.

Os insumos biológicos representam um componente fundamental para a sustentabilidade e eficiência da agricultura moderna, especialmente no contexto de escassez hídrica e pressões ambientais crescentes. O Brasil é reconhecido como o maior produtor e consumidor mundial desses produtos, destacando-se na liderança global do mercado de bioinsumos (BRASIL, 2024). Dados do 2º Workshop ANPII Bio (2025) indicam que o setor movimentou cerca de R\$ 5,7 bilhões na última safra, abrangendo uma área tratada de aproximadamente 156 milhões de hectares ao longo do ano agrícola, com crescimento em torno de 13% na safra 2024/2025 (CropLife Brasil, 2025). Essa expansão reflete a forte adoção de tecnologias biológicas como inoculantes, biofertilizantes e biodefensivos, consolidando o Brasil como o maior mercado mundial, com projeção de faturamento superior a R\$ 9 bilhões até o final da década (ANPII Bio, 2025).

Além da evolução de mercado e movimentação dos investimentos, os bioinsumos promovem melhorias significativas nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, aumentando a capacidade de retenção hídrica e a disponibilidade de nutrientes para a planta e

o uso contínuo favorece a restauração e manutenção da microbiota do solo, essencial para a saúde e longevidade dos sistemas agrícolas (Silva et al., 2025). Este fortalecimento da rizosfera, por meio do estímulo ao crescimento radicular e à atividade metabólica vegetal e microbiana, contribui para a adaptação das culturas a condições de estresse, especialmente a condições de déficit hídrico (Solusolo, 2025).

Os bioinsumos microbianos podem ser classificados de acordo com seus mecanismos de atuação, destacando-se os microrganismos promotores de crescimento vegetal (PGPR), fungos micorrízicos arbusculares e microrganismos antagonistas. No caso das PGPR, seus efeitos benéficos podem ocorrer por mecanismos diretos, como a produção de fitormônios e a solubilização de nutrientes, ou indiretos, como a indução de resistência sistêmica e a modulação da microbiota do solo (Glick, 2012; Lugtenberg; Kamilova, 2009).

Outro aspecto fundamental dos insumos biológicos, além do controle biológico contra inimigos bióticos, é a capacidade de atuação diretamente sobre o metabolismo das plantas, estimulando a produção de fitormônios, antioxidantes e substâncias osmorreguladoras que ajudam a mitigar os efeitos de estresses abióticos (Silva et al., 2025). Com isso, os bioinsumos contribuem para a sustentabilidade agrônômica ao reduzir a necessidade de insumos químicos e minimizar impactos ambientais negativos, promovendo um ciclo produtivo mais equilibrado e eficiente em termos de recursos.

Por fim, o avanço tecnológico, devido a adoção e investimentos, e legal, através da regulação, como a aprovação da Lei de Bioinsumos em 2024, tem impulsionado a inovação e fortalecido o mercado nacional, criando um ambiente propício para investimentos, desenvolvimento de novos produtos e ampliação da competitividade do setor (Governo Federal, 2024). O Brasil, portanto, não apenas consolida sua posição de líder global no uso de bioinsumos, mas também se destaca pela produção, pesquisa e desenvolvimento desses produtos essenciais para o futuro da agricultura sustentável (ANPII Bio, 2025).

2.3.1. *Priestia aryabhatai*

As bactérias promotoras do crescimento de plantas (BPCP) constituem um grupo fundamental dentro dos produtos biológicos, desempenhando múltiplas funções que beneficiam diretamente o desenvolvimento das plantas (Poudel et al., 2021; Armanhi et al., 2021). Elas atuam na fixação biológica de nitrogênio, solubilização de nutrientes, produção de fitormônios como auxinas, citocininas e giberelinas, além de fortalecerem as defesas naturais contra patógenos, além disso, essas interações têm mostrado aumentar a eficiência no uso de recursos

hídricos e nutrientes, essenciais para a produtividade em situações de estresse abiótico (Kim et al., 2021).

Entre os microrganismos promotores de crescimento, as bactérias do gênero *Bacillus*, como a *P. aryabattai* tem ganhado destaque recente por sua capacidade de tolerar estresses como déficit hídrico e salinidade, como o presente estudo buscou retratar. Essa bactéria coloniza a rizosfera e tecido interno das plantas, promovendo o crescimento radicular por meio da produção de auxinas e outras substâncias bioativas, além de auxiliar na regulação osmótica e proteção antioxidante das plantas submetidas a condições adversas (Fuga et al., 2023).

O gênero *Priestia*, anteriormente classificado dentro do gênero *Bacillus*, compreende bactérias Gram-positivas amplamente distribuídas no solo, muitas das quais apresentam capacidade de promover o crescimento vegetal por meio de diferentes mecanismos fisiológicos. Dentre essas, destaca-se a espécie *Priestia aryabhatai*, inicialmente isolada de ambientes extremos e, posteriormente, identificada como rizobactéria com potencial aplicação agrícola. (Park et al., 2017).

Além do estímulo direto ao crescimento vegetal, *P. aryabattai* está associada a atividades de solubilização de fósforo pela liberação de enzimas, produção de exopolissacarídeos e ácidos orgânicos, promovendo eficiência nutricional e indução de resistência que repercute em maior vigor e tolerância das plantas (Fuga et al., 2023). Sua aplicabilidade em diferentes cultivos tem sido amplamente pesquisada, demonstrando resultados promissores para uso em sistemas agrícolas sustentáveis, especialmente em culturas sujeitas a restrições hídricas.

Por fim, a incorporação de microrganismos promotores na agricultura representa uma estratégia biotecnológica eficaz para reduzir a dependência de fertilizantes químicos, aumentar a resiliência das plantas ao estresse, e ainda podendo ter impactos no controle biológico de patógenos, impulsionando a produtividade com práticas sustentáveis (Grover et al., 2014). Esse avanço científico reforça o papel estratégico dos bioinsumos em sistemas agrícolas resilientes e de baixo impacto ambiental.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo geral

Avaliar os efeitos da utilização de bioinsumo a base da bactéria *Priestia aryabattai*, sob os aspectos de desempenho produtivo, crescimento de planta e desenvolvimento de raízes da cultura do sorgo, cultivado em diferentes regimes hídricos.

3.2. Objetivos específicos

- Entender os resultados da aplicação do bioinsumo na cultura do sorgo frente questões fisiológicas da planta afim de validar um insumo biológico a cultura.
- Avaliar o desempenho da cultura sob diferentes níveis de irrigação, buscando testar o comportamento do sorgo frente a utilização do bioinsumo buscando minimizar impactos da deficiência hídrica.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Localização

O experimento foi conduzido em casa de vegetação na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) campus Araras – São Paulo. O clima da região, segundo classificação de Köppen (ano), é do tipo CWa, que significa clima mesotérmico com inverno seco, com precipitação média anual de 1.384 mm e temperatura média anual de 21,6° C. Os dados de temperatura e umidade no interior da casa de vegetação estão apresentados na Figura 1.

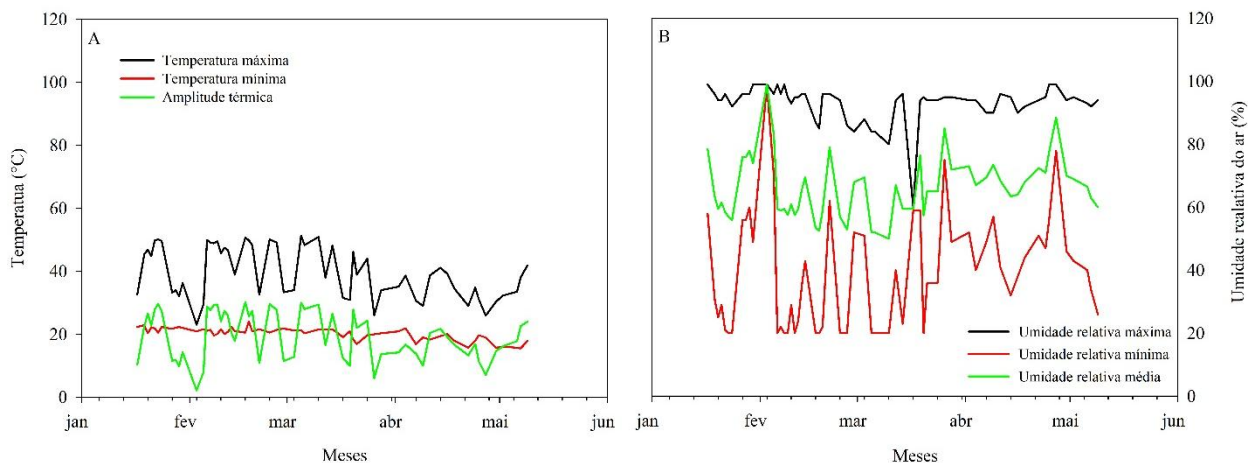


Figura 1: Temperatura do ar (A - máxima, mínima e amplitude térmica) e umidade relativa (B - máxima mínima e média) dentro da estufa durante a condução do experimento com diferentes tratamentos de bioinsumo e manejos de irrigação na cultura do sorgo.

Fonte: Elaborada pelos autores do projeto.

O experimento foi conduzido em Latossolo Vermelho distrófico (referenciar), com as características químicas e granulométricas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características químicas e granulométricas do solo.

Atributos	Valor	Atributos	Valor
pH (CaCl ₂)	5,2	V (%)	52
P _{res} (mg dm ⁻³)	17	B (mg dm ⁻³)	0,16
S (mg dm ⁻³)	6	Cu (mg dm ⁻³)	5,3
K (mmol _c dm ⁻³)	3,6	Fe (mg dm ⁻³)	18
Ca (mmol _c dm ⁻³)	26	Mn (mg dm ⁻³)	79,3
Mg (mmol _c dm ⁻³)	12	Zn (mg dm ⁻³)	1,2
Al (mmol _c dm ⁻³)	0,4	Areia (g dm ⁻³)	160
H+Al (mmol _c dm ⁻³)	38	Silte (g dm ⁻³)	101
M.O. (g kg ⁻¹)	30	Argila (g dm ⁻³)	739

4.2. Delineamento experimental e condução do experimento

O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, em esquema fatorial 3x3, com cinco repetições. Cada unidade experimental foi composta por um vaso de 12 L, preenchido com 10 kg de solo e com duas plantas.

O primeiro fator (bioinsumos) foi constituído pelos seguintes tratamentos: (I) inoculação via semente do sorgo com *P. aryabhatai*, (II) inoculação via semente e coinoculação no florescimento do sorgo (estádio fenológico 6) com *P. aryabhatai* e (III) sem inoculação com *P. aryabhatai*. O segundo fator foi composto pelo manejo da irrigação, sendo (I) aplicação de 85% da necessidade hídrica do sorgo ao longo de todo ciclo (sem déficit hídrico), (II) irrigação com 50% da lâmina de irrigação em todo ciclo da cultura (déficit moderado) e (III) irrigação com 30% da necessidade hídrica em todo ciclo da planta (déficit severo).

Em relação ao bioinsumo, foram aplicadas 4 mL do produto comercial por kg de semente, conforme recomendação do fabricante, sendo utilizada a cepa CNA 1363, na concentração de 1×10^8 unidades formadoras de colônia (UFC) por mL do produto comercial. A inoculação foi realizada nas sementes em laboratório na mesma data da semeadura (14/01/2025). A coinoculação do bioinsumo foi realizada no estágio de florescimento da planta (E6), em 25/03/2025, utilizando 200 mL ha⁻¹ do produto comercial, sendo o produto aplicado na superfície do solo, próximo à base da planta, a medida foi equiparada para os vasos por meio de cálculo referente à área individual dos vasos de 12 L.

A lâmina de irrigação foi determinada pelo método gravimétrico, com base na capacidade de água disponível (CAD) (Klar et al., 1966). Para isso, antes do início do experimento, foi pesado cada vaso preenchido com solo seco, para obtenção da massa do vaso com 0 % de retenção de água (MV0%). Posteriormente, os vasos foram irrigados até o início da percolação, onde ficaram em repouso até que toda a água gravitacional seja perdida, e foram posteriormente pesados para obter a massa do vaso na capacidade máxima de retenção de água (MV100%). A partir dos dados obtidos, foi calculado o conteúdo de água no solo (CAS), em porcentagem, por meio da equação 1 (Varone et al., 2012):

$$CAS = \frac{MV_{tratamento} - MV0\%}{MV100\% - MV0\%} \times 100 \quad (1)$$

O manejo da irrigação foi igual para todos os tratamentos até a planta atingir três folhas (E3), sendo fornecido 85% da CAD. A partir de E3 cada unidade experimental foi irrigada conforme o estabelecido para cada tratamento. Os manejos de 85, 50 e 30% dos tratamentos de irrigação seguiram um padrão de pesagem da massa de cada vaso, no intuito de estimar a evaporação ou percolação do conteúdo de água de cada solo, tendo em vista a massa conhecida de retenção de água em cada tratamento de irrigação, respectivamente. Em seguida, era acrescido em água o valor correspondente a diferença da massa de solo seca adicionado ao valor correspondente ao tratamento de irrigação (85, 50 e 30%), em relação ao valor pesado de cada vaso (Varone et al., 2012).

O híbrido utilizado foi o sorgo granífero Nugrain 420, de porte médio, com elevado potencial produtivo e indicado para as condições edafoclimáticas da região. As sementes foram tratadas com fungicida Carboxin + Thiram e inseticida Tiametoxam. O desbaste das plantas foi realizado 14 dias após a semeadura (28/01/2025), permanecendo inicialmente quatro plantas por vaso. A cada 30 dias foi retirada uma planta de cada unidade experimental para pesagem da massa úmida, sendo esse valor corrigido no cálculo da irrigação. Ao final do experimento cada unidade experimental possuía duas plantas, sendo estas utilizadas para as avaliações dos componentes de produção e rendimento de grãos, colhidas entre 30/04/2025 e 09/05/2025.

O solo foi adubado conforme a necessidade referente a análise de solo, seguindo as recomendações de Duarte et al. (2022), utilizando para adubação de semeadura ureia, cloreto de potássio e superfosfato simples, como fonte de nitrogênio, potássio e fósforo, respectivamente. Foram aplicadas as doses de 20, 40 e 60 kg ha⁻¹ de N, K₂O e P₂O₅, respectivamente. A adubação de cobertura foi realizada no estágio de desenvolvimento 2 (colar da quinta folha visível), sendo aplicado 60 kg ha⁻¹ de N (ureia como fonte) e 20 kg ha⁻¹ de K₂O (cloreto de Potássio como fonte), na data de 09/02/2025. O cálculo de dosagens para adubação

foi realizado seguindo os parâmetros de área do vaso como àqueles referentes a aplicação do bioinsumo.

4.3. Avaliações

4.3.1. Produção de biomassa

A produção de biomassa do sorgo (g planta^{-1}) foi determinada no estágio de grão pastoso (estádio 7) e na fase de maturação fisiológica (estádio 9), em um intervalo de aproximadamente 10 dias. As plantas foram avaliadas dentro do mesmo vaso em função de reduzir o espaço amostral para melhor aproveitamento em avaliações. A determinação em E7 foi crucial para estipulação de dados de silagem, servindo como alternativa de utilização do sorgo. A segunda avaliação para determinar a produção de biomassa (palhada) após a colheita. Para isso, no estágio 7 de desenvolvimento foi colhida a parte aérea de uma das plantas do vaso no dia 02/04/2025, determinada a massa úmida e, posteriormente, seca em estufa de circulação de ar forçada, a $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ até atingir massa constante, para determinar a massa seca. Ao final do ciclo das plantas (estádio 9), logo após a colheita, foi determinada a massa seca da outra planta do vaso, seguindo o mesmo procedimento.

4.3.2. Desenvolvimento da parte aérea da planta, componentes de produção e produção de grãos

No estágio de maturação fisiológica foram determinados os seguintes parâmetros:

- Altura da planta (cm): determinada a partir do nível do solo até o final da panícula, com auxílio de uma régua graduada.
- Altura de inserção da panícula (cm): determinada a partir do nível do solo até o final do pedúnculo, com auxílio de uma régua graduada.
- Comprimento do pedúnculo (cm): verificado com auxílio de uma régua graduada, sendo determinado a partir da folha bandeira até o início da formação da panícula.
- Comprimento da panícula (cm): verificado com auxílio de uma régua graduada.
- Número de grãos por planta: contagem de grãos individualmente por planta.
- Massa de 1000 grãos (g, considerando 13% de umidade): determinado como metodologia estabelecida por Brasil (2009).
- Produção de grãos (g planta^{-1} , considerando 13% de umidade): foram pesados todos os grãos produzidos por cada planta e corrigido o teor de água para 13%.

4.3.3. Desenvolvimento radicular

A avaliação do desenvolvimento radicular foi realizada na fase de maturação fisiológica (E9). Para isso, as plantas foram retiradas do vaso e separadas a parte aérea do sistema radicular.

As raízes foram separadas em amostras menores para armazenamento e avaliação mais precisa no scanner posteriormente, tendo em vista a capacidade de avaliação do sistema. Então, foram acondicionadas em sacos plásticos vedados e congeladas a -2°C e em seguida foram lavadas, guardadas em recipiente contendo 30% de álcool e 70% de água e armazenadas em ambiente refrigerado. Posteriormente, as amostras foram submetidas a um “scanner” de leitura ótica na resolução de 250 dpi, e as imagens obtidas foram analisadas com o programa “Win Mac Rhizo” para determinar área radicular (cm²), diâmetro médio (mm), volume radicular (cm³) e densidade de comprimento radicular (cm de raiz por cm³ de solo). Logo após, as amostras foram colocadas em sacos de papel e secas em estufa de aeração forçada a 60°C até atingir massa constante, para determinação da massa seca em g planta⁻¹.

4.3.4. Produtividade da água da irrigação

A eficiência no uso da água foi obtida por meio da produtividade da água de irrigação (PA_{ir}), na qual foi calculada pela relação entre o valor da produção total (g vaso⁻¹) e a quantidade de água aplicada na irrigação (m³ vaso), em cada tratamento ao final do ciclo (Fernández et al., 2020), conforme equação 1:

$$PA_{ir} = Y \div ITN \quad (1)$$

Onde: PA_{ir} é a produtividade da água de irrigação (kg m⁻³); Y é a produção da cultura (g vaso⁻¹); ITN representa o volume de água aplicado por irrigação (m³ vaso⁻¹).

4.4. Análise estatística

Para verificação da normalidade dos dados, foi utilizado o teste estatístico Kolmogorov-Smirnov e posterior verificação da homoscedasticidade (homogeneidade das variâncias) por meio do teste de Hartley. Os dados com distribuição normal, foram submetidos à análise de variância, com níveis de significância de 5% de probabilidade de erro. Quando significativas, as médias foram submetidas ao teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro, utilizando-se o programa estatístico R. Os gráficos foram produzidos no programa SigmaPlot (versão 14.0).

Os dados também foram submetidos a análise multivariada, por meio da técnica de Análise de Componentes Principais (Hair Jr et al., 2009), utilizando algoritmo de mínimos quadrados parciais interativos não-lineares (NIPALS).

5. RESULTADOS

A massa úmida e a massa seca das plantas de sorgo no estágio E7 foram significativamente influenciadas pelos regimes hídricos e pelos tratamentos com bioinsumos (Figura 2). O manejo de bioinsumo não influenciou a resposta da massa úmida quando não houve restrição hídrica (85% da CAD), contudo, sob déficit hídrico moderado (50% da CAD)

a inoculação e coinoculação com *P. aryabhatai* resultou em acréscimo de 11,6% na massa úmida, em comparação à testemunha (Figura 2A). E, sob déficit severo (30% da CAD) a coinoculação resultou em aumento de 17,5% comparado a inoculação e testemunha (Figura 2A).

Em relação a produção de massa seca, sob cultivo sem déficit hídrico a inoculação resultou em aumento de 11,4% em comparação com a coinoculação e testemunha. Já sob déficit moderado, o manejo de bioinsumo não se diferiu na produção de massa seca. E, sob déficit severo, a testemunha apresentou redução de massa seca na ordem de 27,8% e 15,1% em relação a inoculação e coinoculação, respectivamente (Figura 2B). Esses resultados são indicativos que uso de *P. aryabhatai* pode ser uma ferramenta para maximizar a produção de silagem de sorgo sob condições de déficit hídrico severo.

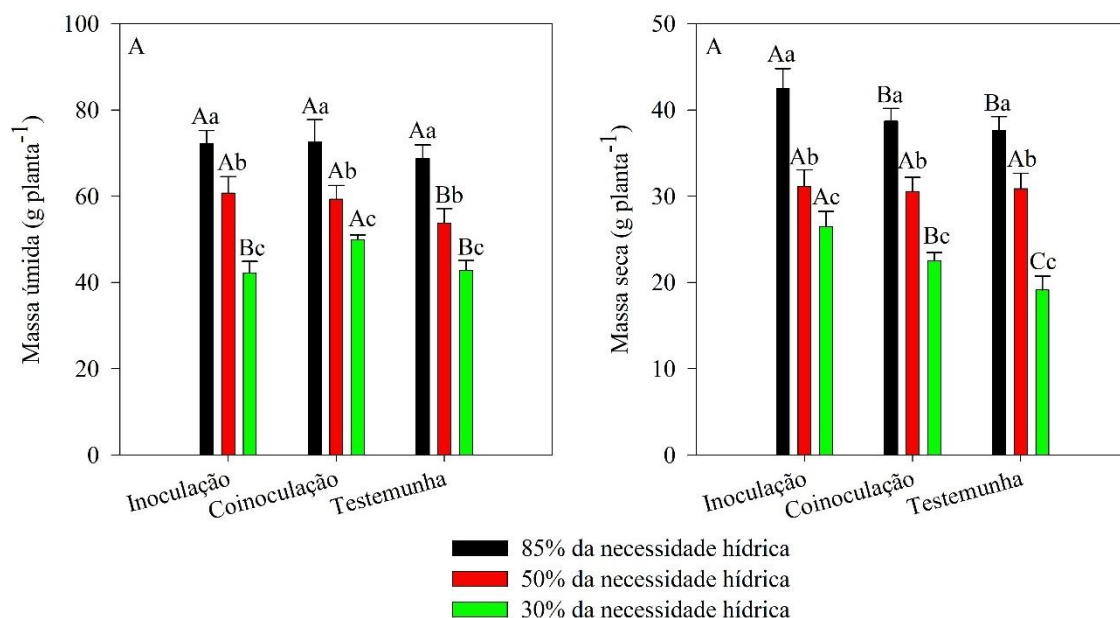


Figura 2: Massa úmida (A) e massa seca (B) das plantas de sorgo no estágio fenológico E6, submetidas a diferentes tratamentos de bioinsumo e manejos de irrigação. Médias com letras iguais maiúsculas não diferem entre si na comparação entre o manejo de bioinsumo dentro de cada regime hídricos, e médias com letras iguais minúsculas não diferem entre si na comparação entre os regimes de irrigação dentro de cada manejo de bioinsumo, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Fonte: Elaborada pelos autores do projeto.

Em relação ao desenvolvimento radicular, o manejo com 85% da CAD resultou em maiores valores dos parâmetros avaliados, sendo que nesse regime hídrico o melhor desempenho foi obtido com a inoculação (Figura 3). Nos tratamentos com deficiência hídrica, houve redução nos valores das variáveis analisadas, especialmente nas plantas cultivadas sob déficit severo. Contudo, sob regime de déficit moderado (50% da CAD) associado à

coinoculação, as plantas de sorgo apresentaram raízes 26% e 14% mais finas, comparadas ao manejo com inoculação e testemunha, respectivamente; a densidade de comprimento radicular foi 40% superior à obtida com inoculação e 1109% maior que a da testemunha; além disso, a massa seca de raízes aumentou em 44% e 36% em relação à inoculação e à testemunha, respectivamente (Figura 3B, 3D e 3E).

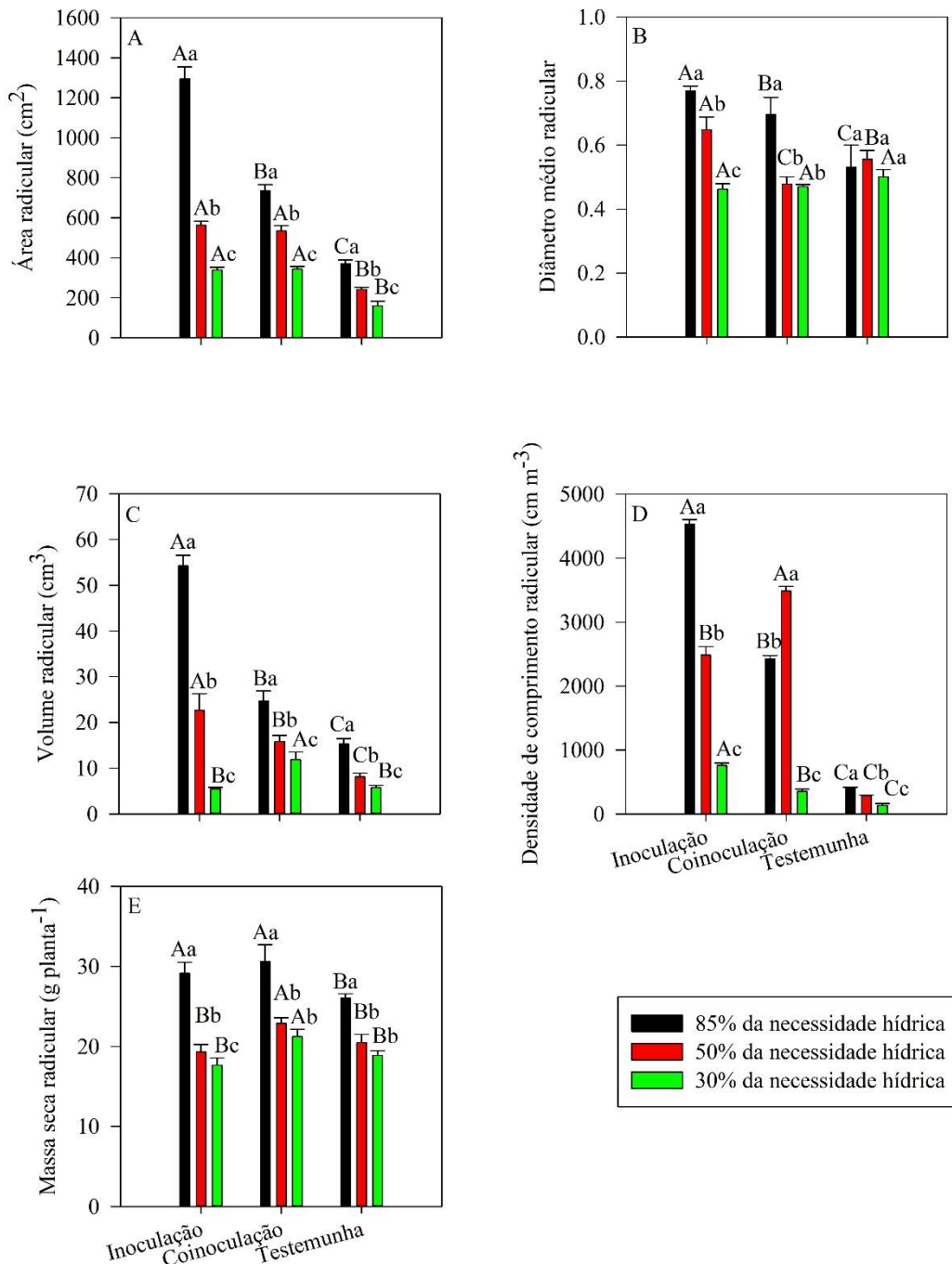


Figura 3: Área radicular (A), diâmetro médio radicular (B), volume radicular (C), densidade de comprimento radicular (D) e massa seca radicular (E) das plantas de sorgo após a colheita, submetidas a diferentes tratamentos de bioinsumo e manejos de irrigação. Médias com letras

iguais maiúsculas não diferem entre si na comparação entre o manejo de bioinsumo dentro de cada regime hídricos, e médias com letras iguais minúsculas não diferem entre si na comparação entre os regimes de irrigação dentro de cada manejo de bioinsumo, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Fonte: Elaborada pelos autores do projeto.

De modo geral, os melhores resultados para a altura da planta e altura de inserção da panícula foram observados nos tratamentos com inoculação e a coinoculação associada ao manejo da irrigação de 85% e 50% da CAD. Já sob déficit severo, a coinoculação contribuiu para maior altura de planta, altura de inserção da panícula, comprimento do pedúnculo e da panícula (Figura 4A, 4B, 4C e 4D).

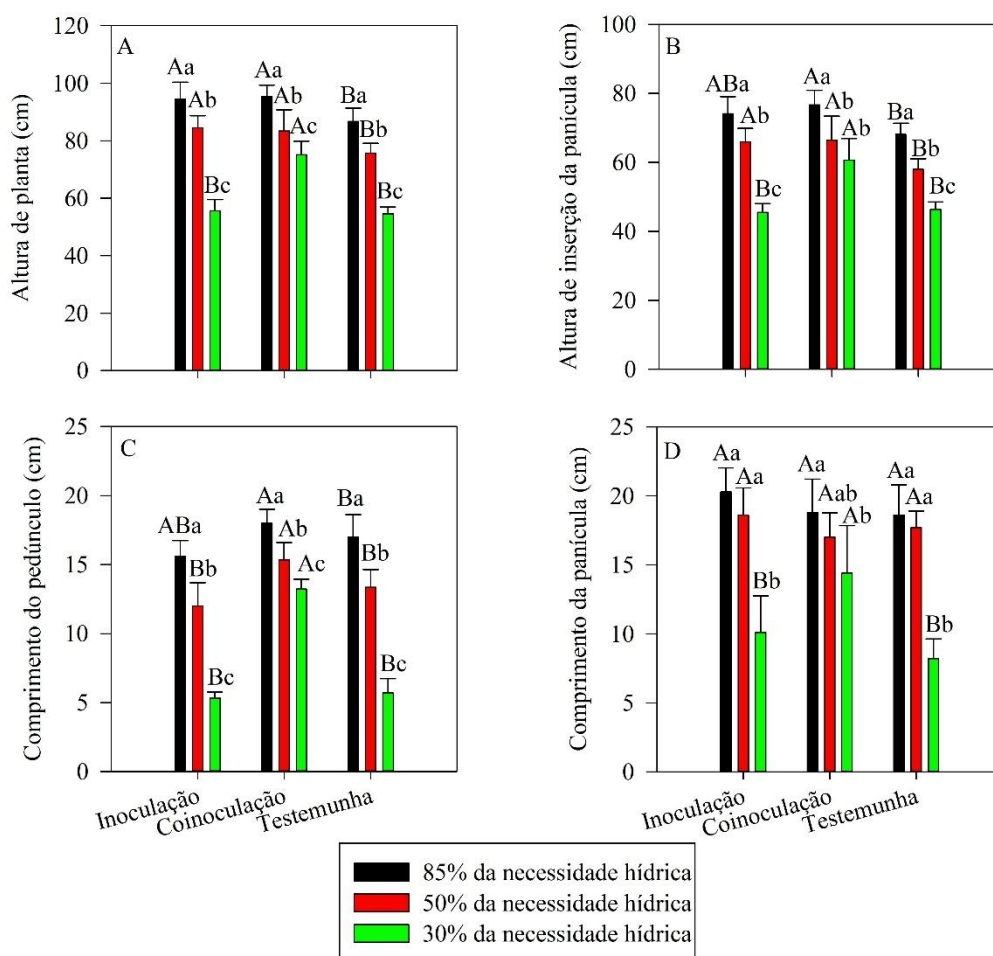


Figura 4: Altura de plantas (A), altura de inserção da panícula (B), comprimento do pedúnculo (C) e comprimento de panícula (D) das plantas de sorgo submetidas a diferentes tratamentos de bioinsumo e manejos de irrigação. Médias com letras iguais maiúsculas não diferem entre si na comparação entre o manejo de bioinsumo dentro de cada regime hídricos, e médias com letras iguais minúsculas não diferem entre si na comparação entre os regimes de irrigação dentro de

cada manejo de bioinsumo, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Fonte: Elaborada pelos autores do projeto.

Em relação aos componentes de produção do sorgo, notou-se que em todos os regimes hídricos a coinoculação resultou em maior número de grãos por planta, produzindo 37%, 28% e 81% a mais que os demais tratamentos nos regimes hídricos de 85%, 50% e 30% da CAD, respectivamente (Figura 5A). A inoculação e a coinoculação com *P. aryabhattai* favoreceu o maior peso de 1000 grãos e a produção de grãos em todos os regimes hídricos (Figura 5B e 5C). Cabe ressaltar que na ausência de déficit hídrico, a coinoculação resultou em aumento de aproximadamente 55% e 66% na produção, comparado à inoculação e testemunha, respectivamente (Figura 5C).

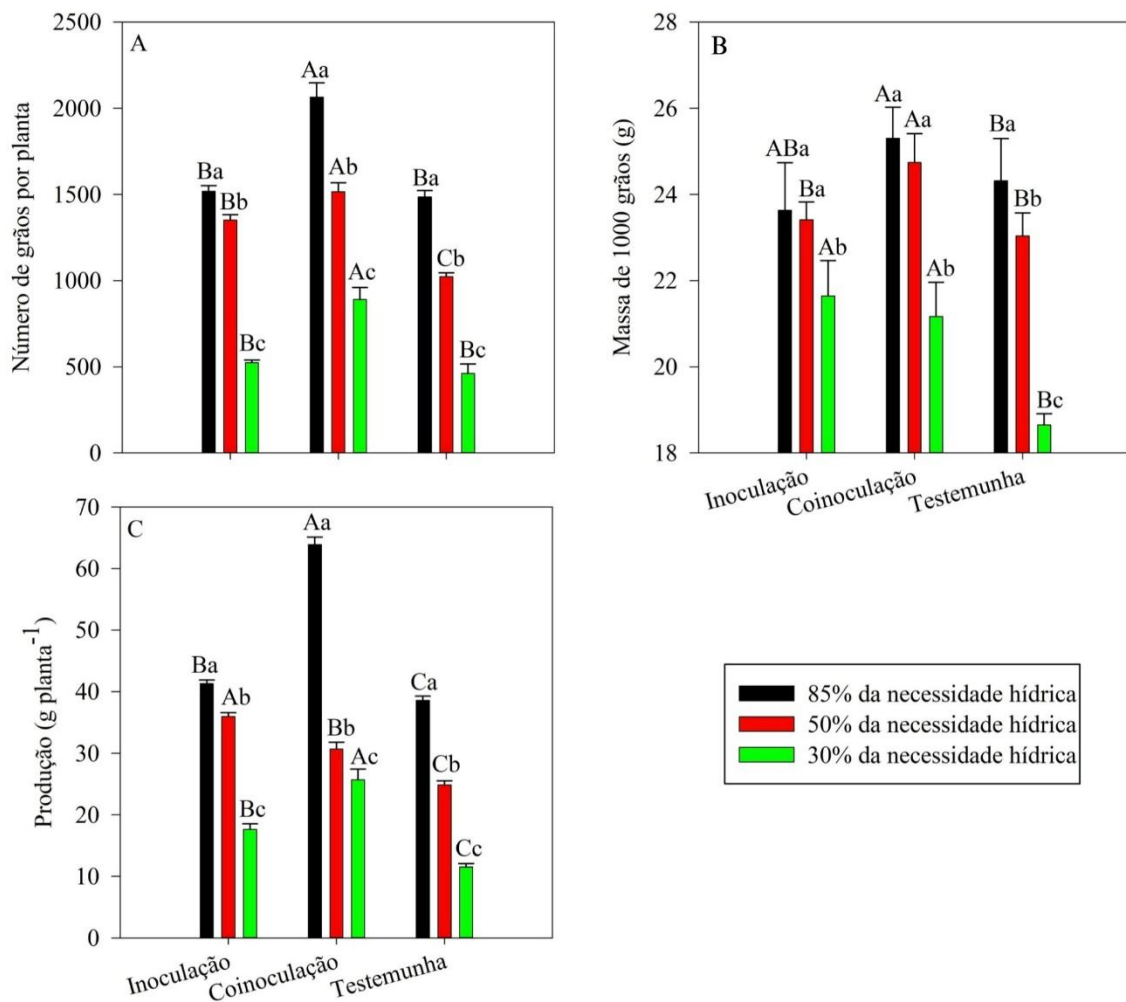


Figura 5: Número de grãos por planta (A), massa de 1000 grãos (B) e produção de grãos (C) das plantas de sorgo submetidas a diferentes tratamentos de bioinsumo e manejos de irrigação. Médias com letras iguais maiúsculas não diferem entre si na comparação entre o manejo de bioinsumo dentro de cada regime hídricos, e médias com letras iguais minúsculas não diferem

entre si na comparação entre os regimes de irrigação dentro de cada manejo de bioinsumo, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Fonte: Elaborada pelos autores do projeto

Em relação ao potencial de produção de massa seca no final do ciclo, não houve interação significativa entre os fatores. Porém, a inoculação e a coinoculação produziram 30% a mais de massa seca, comparada ao tratamento testemunha (Figura 6A). Já no fator irrigação, a maior produção de massa seca foi observada na ausência de deficiência hídrica, sendo superior em 34% e 59% comparado ao manejo de 50% e 30% da CAD, respectivamente (Figura 6B).

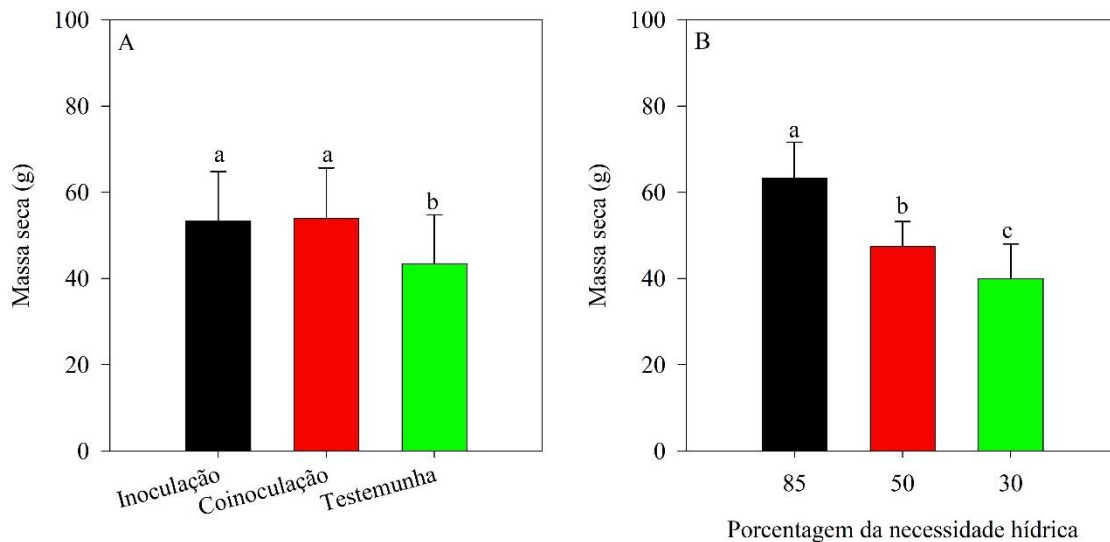


Figura 6: Massa seca do sorgo no estágio fenológico E9, submetidas a diferentes tratamentos de bioinsumo e manejos de irrigação. Médias com letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Fonte: Elaborada pelos autores do projeto.

A maior produtividade da água da irrigação (PAir) foi obtida no tratamento com coinoculação; quando associada com a ausência de déficit hídrico houve incremento de 191% e 29% da PAir, comparado à inoculação e a testemunha, respectivamente; sob déficit moderado o aumento foi de 71% em relação à inoculação, mas sem diferir da testemunha; e sob deficiência severa os resultados foram, em média, superiores em 112%, comparando aos demais manejos de bioinsumos (Figura 7).

De modo geral, a coinoculação resultou na produção de 10,16 kg, 5,03 kg e 3,81 kg de grãos com 1 m³ de água da irrigação, nos regimes de 85%, 50% e 30% da CAD, respectivamente; enquanto a inoculação, teve produção de 3,49 kg, 2,95 kg e 1,43 kg por m³ de água, seguindo a mesma ordem; e a ausência de aplicação de *P. aryabhatai* resultou na produção de 7,87 kg, 5,33 kg e 2,17 kg por m³ de água aplicada, nos regimes de ausência de déficit hídrico, deficiência moderada e severa, respectivamente (Figura 7).

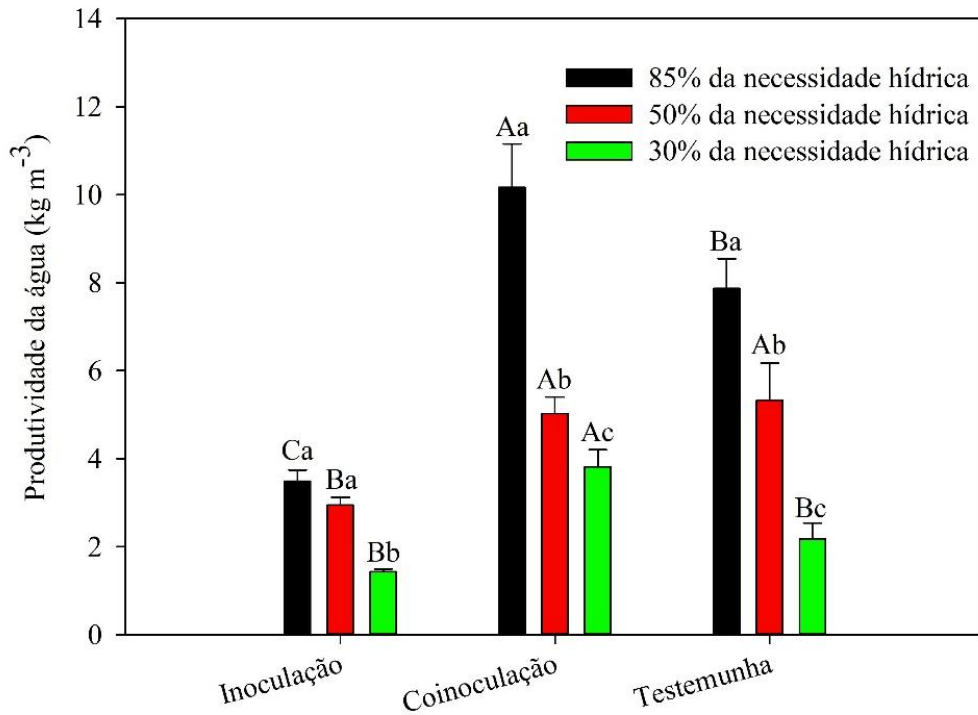


Figura 7: Produtividade da água de irrigação de plantas de sorgo submetidas a diferentes tratamentos de bioinsumo e manejos de irrigação. Médias com letras iguais maiúsculas não diferem entre si na comparação entre o manejo de bioinsumo dentro de cada regime hídricos, e médias com letras iguais minúsculas não diferem entre si na comparação entre os regimes de irrigação dentro de cada manejo de bioinsumo, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

5.1. Análise multivariada dos dados

Para avaliar a relação das variáveis de desenvolvimento sobre a produção do sorgo foi utilizada apenas a primeira componente principal, pois representou mais de 82% da variabilidade total.

Dentre as variáveis analisadas, a produção de biomassa úmida e seca em E7, a altura da planta, a altura de inserção da panícula e o número de grãos foram as que mais influenciaram a produção de grãos do sorgo, com cargas entre 0,27 e 0,28 (Figura 8).

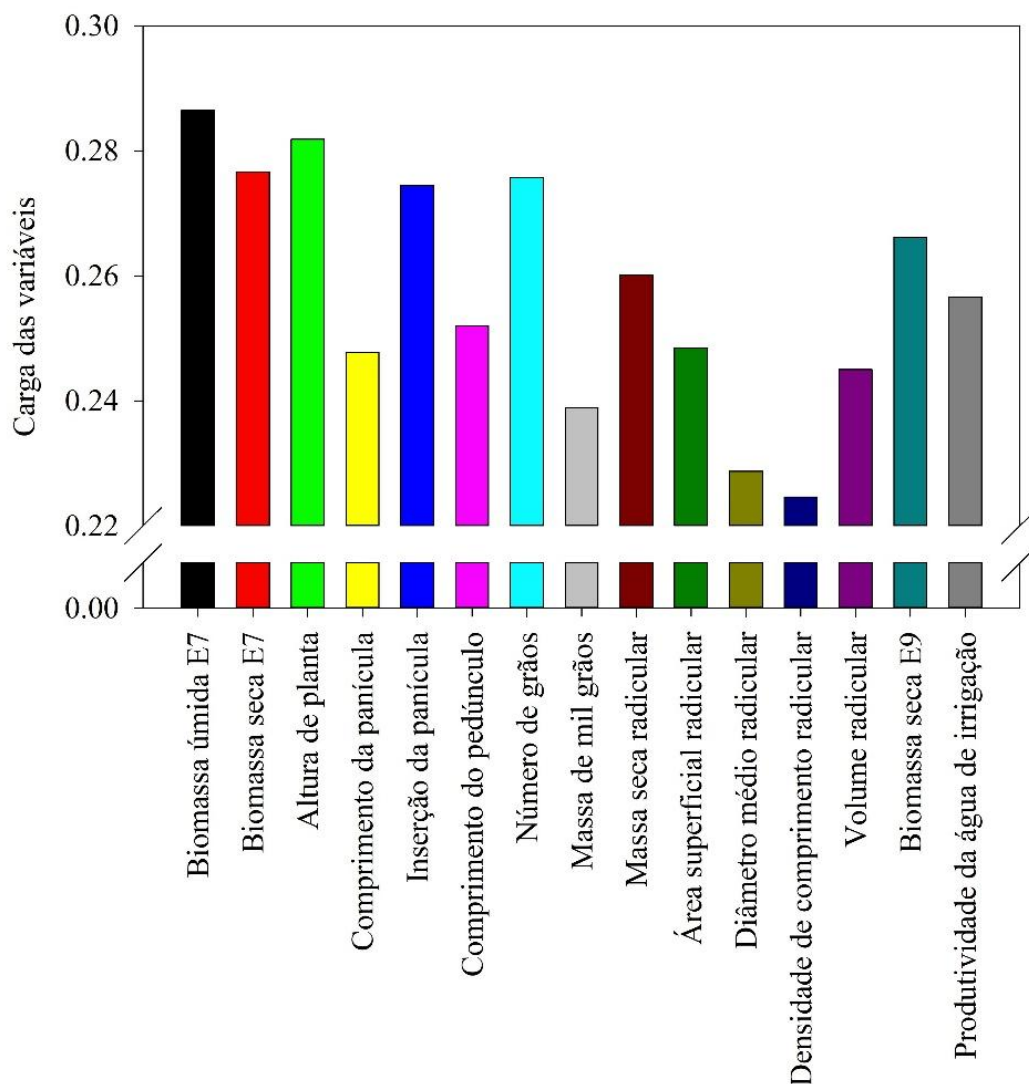


Figura 8: Loading da primeira componente principal das variáveis de desenvolvimento do sorgo, cultivado sob diferentes tratamentos de bioinsumo e manejos de irrigação. Fonte: Elaborada pelos autores do projeto.

Com base no gráfico de dispersão é possível verificar que o tratamento com 85% da CAD associado à coinoculação com *P. aryabhatai* alcançou as maiores produtividades, sendo essas associadas a plantas maiores, com panículas mais altas, com mais grãos por panículas e com maior produção de massa no ponto de silagem (E7) (Figura 9). Os tratamentos com inoculação sob irrigação de 85% e 50% da CAD junto com a testemunha com 85% da CAD, também apresentaram esse comportamento, porém com produção menor (Figura 8). Todos os tratamentos manejados com 30% da CAD mais a testemunha com 50% da CAD apresentaram baixas produção, associando-se a plantas menores, com panículas mais baixas, menor número de grãos e com menor produção de silagem (Figura 9).

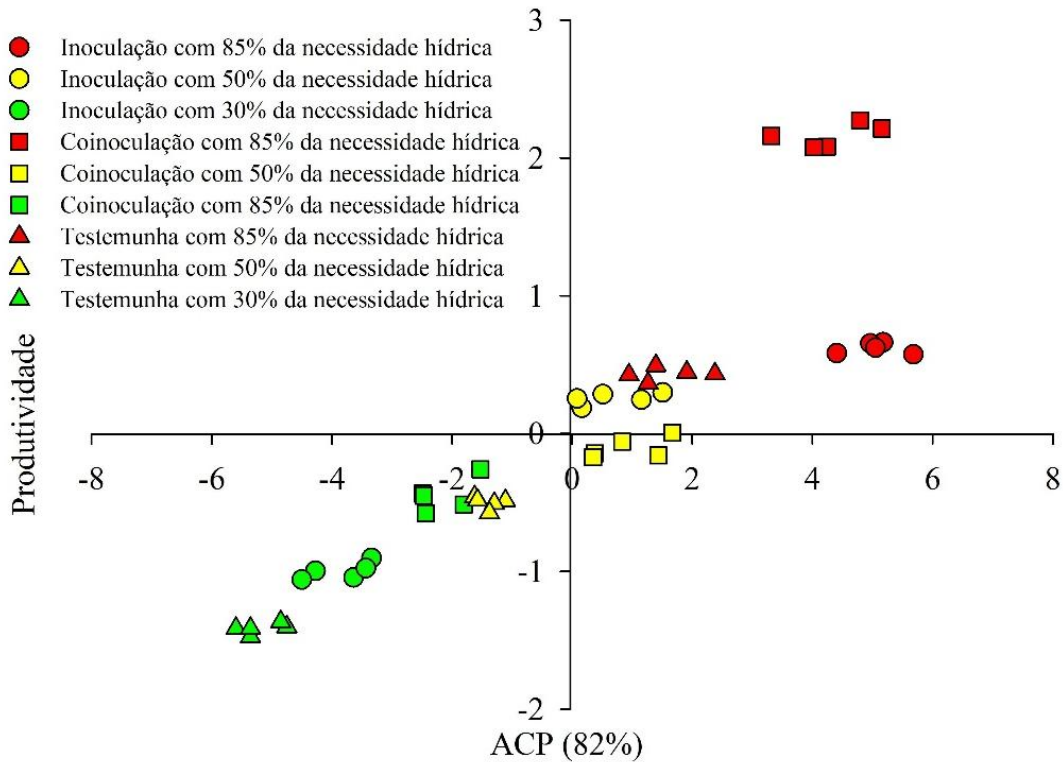


Figura 9: Dispersão das observações da primeira componente principal sobre a produtividade do sorgo, cultivado sob diferentes tratamentos de bioinsumo e manejos de irrigação. Fonte: Elaborada pelos autores do projeto.

Essas associações entre as variáveis também podem ser visualizadas pela correlação de Pearson ($p < 0,0001$), em que é evidente que a produtividade se correlacionou positivamente com quase totalidade das variáveis de desenvolvimento do sorgo, com exceção da área superficial radicular, diâmetro médio de raízes, volume radicular e densidade de comprimento radicular (Figura 10).

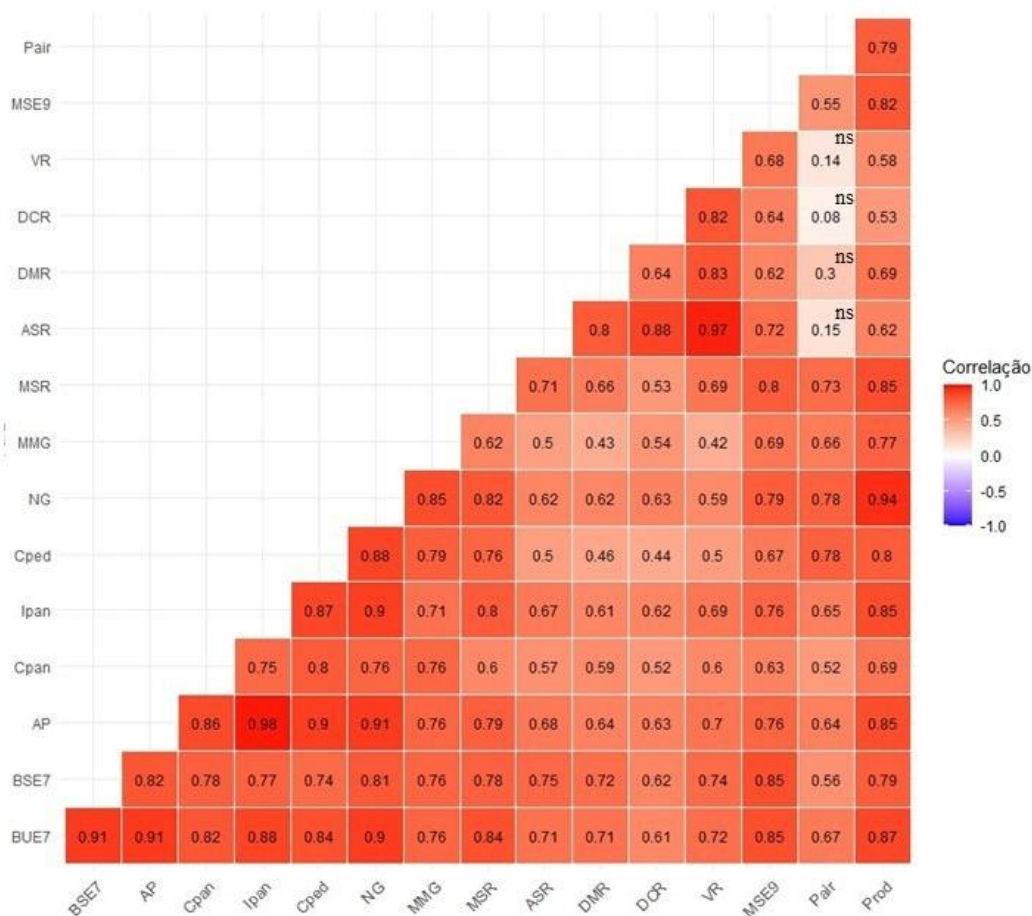


Figura 10: Correlação de Pearson entre as variáveis de desenvolvimento e produção do sorgo, cultivado sob diferentes tratamentos de bioinsumo e manejos de irrigação. Indicativos de siglas nos eixos da figura: BUE7 - Biomassa úmida E7 (g), BSE7 - Biomassa seca E7 (g), AP - Altura da planta (cm), Cpan - Comp. panícula (cm), Ipan - Inserção panícula (cm), Cped - Comp. pedúnculo (cm), NG - Número de grãos, MMG - Massa 1000 grãos (g), MSR - MS raízes total (g), ASR - Área radicular (cm²), DMR - Diâmetro radicular (mm), DCR - Densidade radicular (cm m⁻³), VR - Volume radicular (cm³), MSE9 - Massa seca E9 (g), Pair – Produtividade de água da irrigação (kg m⁻³) e Prod - Produção (g planta⁻¹). Para relações não significativas foi atribuído o código indicativo (ns), as demais relações foram significativas (p<0,0001). Fonte: Elaborada pelos autores do projeto.

6. DISCUSSÃO

Os resultados desta pesquisa mostram que o manejo da inoculação e da coinoculação com *P. aryabhattai* é uma ferramenta biotecnológica eficiente para minimizar os efeitos do déficit hídrico na cultura do sorgo, tanto para produção de silagem, grãos e massa seca para cobertura do solo (Figuras 2 a 9). Além disso, esses resultados demonstram que apesar do sorgo

ser considerado uma cultura rústica, sendo normalmente cultivado em áreas marginais, o manejo adequado da irrigação maximiza a produção dessa cultura, elevando as produtividades em viés da busca de manejos que maximizem a produção da área e a rentabilidade.

O sorgo é considerado uma cultura com grande desempenho e plasticidade quando relacionado a capacidade de tolerar e se desenvolver sob condições de estresse, com boa manutenção de parte aérea e desenvolvimento de sistema radicular (Santos et al., 2014). Isso permite que a cultura se desenvolva mesmo sob uma gama de condições adversas, influenciando na adaptação dessas plantas frente a essas condições, resultando em mudanças fenotípicas que podem garantir maior rendimento produtivo (Ghate et al, 2017). Ademais, é possível maximizar esses resultados de desempenho em raízes e parte aérea quando culturas, como o sorgo, são associados a rizobactérias promotoras de crescimento, que induzem a uma série de fatores junto a micorriza, influenciando no desenvolvimento dessas plantas.

Além disso, microrganismos como as rizobactérias, sobrevivem nos solos frente a condições adversas de estresse através de mecanismos que se associam as plantas na rizosfera, se aproveitando da relação simbiótica e consumindo os exsudatos das plantas. Alguns destes mecanismos são: produção de exopolissacarídeos, formação de biofilme, formação de hormônios e solubilização de nutrientes, ajudam a manter um ambiente com certa umidade para o desenvolvimento de raízes e atuam como promotoras de crescimento nas plantas (Kavamura, 2017). Estes fatores podem ter contribuído para os resultados de raízes em destaque para a inoculação e coinoculação (Figuras 3).

Em detrimento dos resultados observados na Figura 3C (diâmetro médio de raízes), é possível analisar que, em situações de escassez hídrica, as plantas se comportam de modo a investir fotoassimilados em raízes mais finas e longas em tentativa de minimizar a escassez de água e nutrientes, observado especialmente nos valores de 30 e 50% da irrigação (SHAREEF et al., 2018). Algo interessante de analisar nos mesmos resultados é o padrão de comportamento dos tratamentos com a utilização de bioinsumos, especialmente coinoculação a 50% da irrigação, que obtiveram resultados de diâmetros maiores, podendo indicar a minimização do estresse sofridos pelas plantas desses tratamentos, que tiveram raízes mais grossas.

Em Lee et al. (2012), a utilização da inoculação de sementes com cepas de *P. aryabattai* promoveu aspectos de crescimento em comprimento de raízes, brotações e parte aérea, evidenciando a influência do bioinsumo no desempenho das plantas. Porém, destacam que em condições ideais de fornecimento de água, as bactérias podem não atingir todo o desempenho de promoção de crescimento da planta, o que pode corroborar para a proximidade estatística dos fatores da Figura 4 (4B, 4C e 4D) quando manejados com 85% da necessidade hídrica. O

fator bioinsumo no desempenho de plantas foi mais evidente quando relacionado ao estresse hídrico de 50 e 30% (Figuras 2 a 9), em que a bactéria teve impactos diretos no crescimento das plantas. Isso comportamento também pode ser observado na análise de correlação de Pearson (Figura 10), em que algumas variáveis de desempenho como altura, inserção da panícula e biomassa, tiveram as melhores correlações com os índices produtivos.

Em milho, cultivado com inoculação de *P. aryabhattai*, o desenvolvimento de área foliar, caule e parte aérea teve correlação direta com a produção de ácido indolilacético, solubilização de cálcio e fósforo, além da produção de amônia (Kavamura et al., 2017). Estes fatores são intrínsecos para análise do desempenho do bioinsumo em inoculação e coinoculação no experimento, especialmente quando levado em consideração a correlação significativa de todos os fatores de desempenho e produção do sorgo, e de forma mais direta ainda, quando comparados frente à produção (Figura 10).

Bactérias do gênero *Bacillus* são capazes de reduzir os danos as células das plantas de sorgo, em função dos fatores de promoção de crescimento e atividade micorrízica, além de aumentar o crescimento vegetativo, conteúdo de água nas plantas e o conteúdo de prolina nas células, sendo estas respostas diretas relacionadas ao estresse (Saad e Abo-Koura, 2018).

O déficit hídrico configura-se como um dos estresses abióticos mais relevantes para os sistemas agrícolas, afetando aproximadamente 64% das áreas terrestres do planeta (Cramer et al., 2011). Nas plantas, a limitação da disponibilidade de água compromete o fluxo hídrico para as células em expansão, restringindo a turgescência celular e, conseqüentemente, interrompendo o crescimento vegetativo. Esse processo reduz a translocação e o aproveitamento dos fotoassimilados, ocasionando acúmulo de açúcares nas folhas e diminuição do teor de açúcares solúveis totais (Chaves e Oliveira, 2004). Por meio da análise de produtividade da água da irrigação (Figura 6), é possível observar como a coinoculação resultou em ganhos de produção frente a um melhor uso da água em 85 e 30% da irrigação, demonstrando que é importante buscar práticas que aumentem a eficiência das plantas, fator este que, se correlacionou direta e positivamente com a altura de plantas, número de grãos e biomassa, impactando na produção (Figuras 7, 9 e 10).

Dessa forma, é evidente que dentre as condições adversas que as culturas podem enfrentar, o déficit hídrico afeta diretamente o desenvolvimento, potencial produtivo e as características de plasticidade do sorgo (Figura 2 a 9), e a inclusão de manejos biotecnológicos (inoculação e coinoculação com *P. aryabhattai*) pode reduzir os impactos dessas condições adversas.

Sob condições diretas de estresse hídrico, as bactérias do gênero *Bacillus* spp. demonstraram a capacidade de induzir a não inibição do crescimento em plantas de cana de açúcar, dentre alguns fatores, devido a produção de enzimas, como a invertase ácida, que promovem a hidrólise de sacarose e polissacarídeos armazenados em tecidos de fotoassimilação, permitindo que as raízes se redirecionem e distribuam açúcares nos tecidos induzindo ao crescimento e absorção de água e minerais (Chandra et al., 2018), que são fatores que podem ter influenciado diretamente alguns aspectos de desempenho e produção do sorgo (Figura 2 e 4). Alguns desses fatores, também são associados ao potencial de atuação de biofertilizantes das bactérias do gênero *Bacillus*, promovendo a solubilização de fosfatos e a produção de AIA (Bahadir et al., 2018), corroborando para os efeitos nos valores destacados nos aspectos produtivos e desenvolvimento de raiz e parte aérea.

Além disso, o desempenho superior dos tratamentos com a bactéria pode estar relacionado à promoção de condições fisiológicas mais favoráveis ao desenvolvimento da parte aérea. Conforme demonstrado por May et al. (2019), plantas de cana-de-açúcar tratadas com *P. aryabhatai* apresentam maior expansão radial das células do caule devido à excreção de fitormônios, especialmente citocininas, absorvidos pelas raízes. Esses reguladores exercem influência direta sobre a formação e o funcionamento dos vasos do xilema, mitigando o estresse hídrico e favorecendo a translocação de nutrientes e fotoassimilados.

Tais mecanismos ajudam a explicar os maiores valores observados para variáveis produtivas no presente estudo. De acordo com a análise de correlação de Pearson (Figura 10), características como massa seca e úmida das plantas, altura, número de grãos e massa de mil grãos apresentaram as maiores correlações positivas com o fator produção. Esses resultados são consistentes com o efeito mitigador do estresse hídrico conferido pela bactéria às plantas de sorgo.

A coinoculação de microrganismos é uma estratégia agrônômica utilizada para reintroduzir ou complementar comunidades microbianas associadas às plantas, geralmente por meio de uma calda contendo diferentes produtos e inoculantes. Entretanto, sua eficiência depende de estudos específicos sobre os efeitos proporcionados e o momento ideal de aplicação (DRESSLER et al., 2025). No presente estudo, diversos componentes avaliados evidenciaram o desempenho superior do tratamento com coinoculação na cultura do sorgo. Esse efeito ficou mais evidente ainda na análise multivariada dos dados, que relaciona os componentes avaliados à produtividade e destaca os tratamentos que apresentaram os melhores resultados (Figura 9). Isso pode ser atribuído ao fato de que a coinoculação promoveu uma reativação de mais

bactérias em contato com a rizosfera e em um estágio fenológico (florescimento), de alta exigência hídrica, contrastando o déficit com a ação dos microorganismos reinseridos.

Embora ainda sejam escassos os estudos sobre a inoculação de *P. aryabhatai* na cultura do sorgo, os resultados obtidos nesta pesquisa evidenciam que a deficiência hídrica pode comprometer de forma significativa o desempenho produtivo da cultura. No entanto, o manejo com *P. aryabhatai*, por meio de inoculação ou coinoculação, mostrou-se promissor na mitigação dos efeitos negativos do déficit hídrico. É importante destacar que o presente estudo foi conduzido em condições de casa de vegetação, o que reforça a necessidade de experimentações adicionais em campo para validar e ampliar esses achados. Além disso, a dose utilizada baseou-se em recomendações estabelecidas para a cultura do milho, indicando a importância de novas investigações sobre diferentes doses, estratégias de reaplicação e momentos fenológicos ideais. Tais estudos são fundamentais para otimizar o desempenho produtivo do sorgo e maximizar a eficiência do uso da água na agricultura.

7. CONCLUSÃO

A aplicação de *P. aryabhatai* minimiza os efeitos do déficit hídrico na cultura do sorgo. Sendo que a coinoculação promoveu incrementos expressivos na produção de biomassa, no desenvolvimento radicular, no desempenho produtivo e na eficiência do uso da água, destacando-se como estratégia biotecnológica robusta para mitigar os efeitos do déficit hídrico sobre o desenvolvimento e a produtividade do sorgo, especialmente sob condições de déficit hídrico moderado (50% da capacidade de água disponível do solo).

O déficit hídrico moderado e severo restringe o desenvolvimento e a produção do sorgo granífero.

8. DECLARAÇÃO SOBRE O USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL GENERATIVA

Foram utilizadas ferramentas de inteligência artificial generativa (IA), especificamente o modelo ChatGPT (OpenAI), com o objetivo de auxiliar na redação, organização e/ou revisão do texto científico. Todo o conteúdo gerado por IA foi cuidadosamente revisado e validado pelos autores, que assumem total responsabilidade pela precisão, originalidade e integridade das informações apresentadas. Nenhuma decisão analítica, interpretação de dados ou conclusão científica foi realizada exclusivamente por ferramentas de IA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREHA, K. B.; ENYEW, M.; CARLSSON, A. S.; VETUKURI, R. R.; FEYISSA, T.; MOTLHAODI, T.; NG'UNI, D.; GULETA, M. Sorghum in dryland: morphological, physiological, and molecular responses of sorghum under drought stress. *Planta*, v. 255, 20, 2022. 10.1007/s00425-021-03799-7
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Impactos da mudança climática sobre os recursos hídricos no Brasil. Relatório, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/clima-e-recursos-hidricos/relatorios/impactos-mudanca-climatica-recursos-hidricos-brasil-2024.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2025.
- ANPII BIO. Dados de mercado de bioinsumos - safra 2024/2025. Associação Nacional de Promoção e Inovação da Indústria de Biológicos, 2025. Disponível em: <https://anpiibio.org.br/estatisticas/>. Acesso em: 14 nov. 2025.
- ARMANHI, J. S. L.; SOUZA, R. S. C.; BIAZOTTI, B. B.; YASSITEPE, J. E. D. C. T.; ARRUDA, P. Modulating drought stress response of maize by a synthetic bacterial community. *Frontiers in Microbiology*, v. 12, article 747541, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.747541>.
- ASSEFA, Y.; STAGGENBORG, S. A.; PRASAD, V. P. V. Grain sorghum water requirement and responses to drought stress: A review. *Crop Management*, V. 9, N.1 P. 1-11, 2010. 10.1094/CM-2010-1109-01-RV.
- ÁVILA, R. G.; MAGALHÃES, P. C.; SILVA, E. M.; ALVARENGA, A. A.; REIS, C. O.; CUSTODIO, A. M.; JAKELAITIS, A.; SOUZA, T. C. Foliar application of potassium nitrate induces tolerance to water deficit in pre-flowering sorghum plants. *Acta Scientiarum-Agronomy*, v. 44, p. 1-11, 2022. 10.4025/actasciagron. v44i1.53069.
- BAHADIR, P. S.; LIAQAT, F.; ELTEM, R. Plant growth promoting properties of phosphate solubilizing *Bacillus* species isolated from the Aegean Region of Turkey. *Turkish Journal of Botany*, v. 42, n. 2, p. 183-196, 2018. 10.3906/bot-1706-51.
- BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; COMIRAN, F.; BERGONCI, J. I.; MÜLLER, A. G.; FRANÇA, S.; SANTOS, A. O.; RADIN, B.; BIANCHI, C. A. M.; PEREIRA, P. G. Water deficit and yield in maize crop. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 41, n. 2, p. 243-249, 2006. 10.1590/S0100-204X2006000200008.
- BORÉM, A.; PIMENTEL, L.; PARRELLA, R. *Sorgo do plantio a colheita*. Viçosa: UFV, 2014. 275 p.

- BORGHI, E.; BORTOLON, L.; AVANZI, J. C.; BORTOLON, E. S. O.; UMMUS, M. E.; GONTIJO NETO, M. M.; COSTA, R. V. Desafios das novas fronteiras agrícolas de produção de milho e sorgo no Brasil: desafios da região do MATOPIBA. In: KARAM, D.; MAGALHÃES, P. C. (Eds.). Eficiência nas cadeias produtivas e o abastecimento global. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2014. p. 263–278.
- BRASIL. Lei nº 15.070, de 23 de dezembro de 2024. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 24 dez. 2024. Disponível em: http://legislacao.planalto.gov.br/legisla/legislacao.nsf/Viw_Identificacao/lei%2015.070-2024?OpenDocument. Acesso em: 10 dez. 2025.
- BRASIL. Líder global na utilização de bioinsumos, Brasil apresenta panorama regulatório e mercado em expansão. *Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/lider-global-na-utilizacao-de-bioinsumos-brasil-apresenta-panorama-regula>. Acesso em: 08 nov. 2025.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Regras para Análise de Sementes. Brasília, DF: MAPA/ACS, 2009. 399 p.
- BRUNINI, O.; CARDOSO, M. Effect of soil water stress on stomatal resistance and leaf water potential of rubber tree seedlings. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 33, n. 7, p. 1053-1060, 1998.
- BUITRAGO, R. B.; BASHAN, L. E. G.; PEDRAZA, R. O. Bacterias promotoras de crecimiento vegetal en sistemas de agricultura sostenible. Mosquera (Colombia): Agrosavia, 2021. 372p.
- CHANDRA, P.; TRIPATH, P.; CHANDRA, A. Isolation and molecular characterization of plant growth-promoting *Bacillus* spp. and their impact on sugarcane (*Saccharum* spp. hybrids) growth and tolerance towards drought stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, v. 40, p. 199–214, 2018. 10.1007/s11738-018-2770-0.
- CHAVES, M. M.; OLIVEIRA, M. M. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture. *Journal of Experimental Botany*, v. 55, n. 407, p. 2365–2384, 2004. v. 10.1093/jxb/erh269.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Sorgo: série histórica. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras/itemlist/category/912-sorgo>. Acesso em: 13 de novembro de 2025.
- CRAMER, G.R.; URANO, K.; DELROT, S. et al. Effects of abiotic stress on plants: a systems biology perspective. *BMC Plant Biol*, v. 11, 163, 2011. 10.1186/1471-2229-11-163.

- CROP LIFE BRASIL. Dados de mercado - safra 2024/2025. CropLife Brasil, 2025. Disponível em: <https://croplifebrasil.org/publicacao/bioinsumos-do-brasil-dados-de-mercado-do-setor/>. Acesso em: 10 nov. 2025.
- DENG, C.; ZHANG, N.; LIANG, X.; HUANG, T.; LI, B. *Bacillus aryabhattai* LAD impacts rhizosphere bacterial community structure and promotes maize plant growth. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 102, n. 14, p. 6650-6657, 2022. 10.1002/jsfa.12032
- DEVNARAIN, N.; CRAMPTON, B. G.; CHIKWAMBA, R.; BECKER, J. V. W.; O'KENNEDY, M. M. Physiological responses of selected African sorghum landraces to progressive water stress and re-watering. *South African Journal of Botany*, v. 103, p. 61-69, 2016. 10.1016/j.sajb.2015.09.008
- DRESSLER, A. L.; MICHELON, C. J.; JUNGES, E.; GARBIN, A. C. ; SILVA, B. R. ; SIMÕES, P. O. ; SCHMOHEL, C. A. ; DAMASCENO, F. ; STRECK, E. A. Eficácia da inoculação e coinoculação de bactérias na nodulação e produtividade da soja. *Observatório Latinoamericano de Educação em Agronomia*, v. 5, n. 1, p. 1-12, 2025. v. 10.55905/oelv23n10-047.
- DUARTE, A. P.; SAWAZAKI, E.; FREITAS, R.S.; CANTARELLA, H. Sorgo granífero, forrageiro e vassoura (*Sorghum bicolor*). In: CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; MATTOS Jr., D.; BOARETTO, R.M.; van RAIJ, B. Boletim 100: recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. Campinas – SP: Instituto Agrônômico (IAC), p. 227-230, 2022.
- EMBRAPA. Sorgo: plantio e manejo. Embrapa, 2020. Disponível em: <https://infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1006340>. Acesso em 07 nov. 2025.
- FERNÁNDEZ, J. E.; ALCON, F.; DIAZ-ESPEJO, A.; HERNANDEZ-SANTANA, V.; CUEVAS, M. V. Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: a case study of a super high density olive tree orchard. *Agricultural Water Management*, v. 237, p. 106074, 2020. 10.1016/j.agwat.2020.106074
- FRAIRE-VELÁZQUEZ, S.; BALDERAS-HERNÁNDEZ, V. E. Abiotic stress in plants and metabolic responses. In: VAHDATI, K.; LESLIE, C. Abiotic stress: plant responses and applications in agriculture. London: IntechOpen, 2013. 10.5772/54859
- FREITAS, F. G.; MAGNABOSCO, A. L. Demanda futura por água em 2050: desafios da eficiência e das mudanças climáticas. São Paulo: Exante, 2025. 68p. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2025/10/Demanda-futura-por-agua-em-2050-v.-2025-10-23-baixa.pdf>. Acesso em: 03 de nov. 2025.

- FUGA, C. A. G.; CAIXETA, G. A. N.; CAIXETA, C. F.; MELO, I. S. Growth promotion in maize (*Zea mays* L.) by *Bacillus aryabhatai* strain CMAA 1363. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.18, n.3, e3340, 2023. 10.5039/agraria.v18i3a3340
- GHATE, T.; DESHPANDE, S.; BHARGAVA, S. Accumulation of stem sugar and its remobilisation in response to drought stress in a sweet sorghum genotype and its near-isogenic lines carrying different stay-green loci. *Plant biology*, v. 19, n. 3, p. 396-405, 2017. 10.1111/plb.12538
- GITZ, V. Climate change and food security: risks and responses. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) Report, v. 110, p. 2-4, 2016.
- GLICK, B. R. Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. **Scientifica**, 2012.
- GOVERNO FEDERAL. Lei de Bioinsumos e o futuro do agronegócio. Ministério da Agricultura, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inovacao/bioinsumos/o-programa/marco-regulatorio-1/marco-regulatorio-lei-no-15-070>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- GROVER, M.; MADHUBALA, R.; ALI, S. Z.; YADAV, S. K.; VENKATESWARLU, B. Influence of *Bacillus* spp. strains on seedling growth and physiological parameters of sorghum under moisture stress conditions. *Journal of Basic Microbiology*, v. 54, n. 9, p. 951-961, 2014. 10.1002/jobm.201300250.
- HAIR, J. F., Jr.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. Análise multivariada de dados, 6th ed.; Bookman: Porto Alegre, Brazil, 2009.
- KARUMANCHI, A. R.; SIVAN, P.; KUMMARI, D.; RAJASHEKER, G.; KUMAR, S. A.; REDDY, P.S.; SURAVAJHALA, P.; PODHA, S.; KISHOR, P.B.K. Root and Leaf Anatomy, ion accumulation, and transcriptome pattern under salt stress conditions in contrasting genotypes of *Sorghum bicolor*. *Plants*, v. 12, 2400, 2023. 10.3390/plants12132400.
- KAVAMURA, V. N.; SANTOS, S. N.; TAKETANI, R. G.; VASCONCELLOS, R. L. F.; MELO, I. S. Draft genome sequence of plant growth-promoting drought tolerant *Bacillus* sp. Strain CMAA 1363 isolated from the Brazilian caatinga biome. *Genome Announcements*, v. 5, n. 5, p. e01534-16, 2017. 10.1128/genomeA.01534-16.
- KIM, H.; SEOMUN, S.; YOON, Y.; JANG, G. Jasmonic acid in plant abiotic stress tolerance and interaction with abscisic acid. *Agronomy*, v. 11, n. 9, article 1886, 2021. 10.3390/agronomy11091886.

- KIM, Yong Cheol; GUTIERREZ, Jairo; KIM, Seung Hun; LEE, Young Hun. Drought stress tolerance in plants by plant growth-promoting rhizobacteria. *Frontiers in Plant Science*, Lausanne, v. 12, p. 1–14, 2021.
- KLAR, A. E.; VILLA NOVA, N. A.; MARCOS, Z. Z.; CERVellini, A. Determinação da umidade do solo pelo método das pesagens. *Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"*, v. 23, p. 16-30, 1966.
- LEE, S.; KA, J. O.; SONG, H. G. Promotion of growth of *Xanthium italicum* by application of rhizobacterial isolates of *Bacillus aryabhatai* in microcosm soil. *The Journal of Microbiology*, v. 50, n. 1, p. 45-49, 2012. 10.1007/s12275-012-1415-z
- LUGTENBERG, B.; KAMILOVA, F. Plant-growth-promoting rhizobacteria. **Annual Review of Microbiology**, 2009.
- MAY, A.; MOREIRA, B. R. A.; MASCARIN, G. M.; VIANA, R. S.; SANTOS, M. S.; SILVA, E. H. F. M.; DE MELO, I. S. Induction of drought tolerance by inoculation of *Bacillus aryabhatai* on sugarcane seedlings. *Científica*, v. 47, n. 4, p. 400-410, 2019. 10.15361/1984-5529.2019v47n4p400-410
- MENDOZA-LABRADOR, J.; ROMERO-PERDOMO, F.; HERNÁNDEZ, J-P.; URIBE-VÉLEZ, D.; BUITRAGO, R. B. *Bacillus strains* immobilized in alginate macrobeads enhance drought stress adaptation of guinea grass. *Rhizosphere*, v. 19, p. 100385, 2021. 10.1016/j.rhisph.2021.100385
- MONTEIRO, M. C. D.; ANUNCIACÃO FILHO, C. J.; TABOSA, J. N.; OLIVEIRA, F. J. de; REIS, O. V. dos; BASTOS, G. Q. Avaliação do desempenho de sorgo forrageiro para o semiárido de Pernambuco. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v. 3, n. 1, p. 52-61, 2004.
- MORENO-GALVÁN, A.; ROMERO-PERDONO, F.; ESTRADA-BONILA, G.; MENESES, C. H. S. G.; BONILA, R. R. Dry-caribbean *Bacillus* spp. strains ameliorate drought stress in maize by a strain-specific antioxidant response modulation. *Microorganisms*, v. 8, n. 6, p. 823, 2020. 10.3390/microorganisms8060823
- PARK, Y-G.; MUN, B-G.; KANG, S-M.; HUSSAIN, A.; SHAHZAD, R.; SEO, C-W.; KIM, A-Y.; LEE, S-U.; OH, K. Y.; LEE, D. Y.; LEE, I-J.; YUN, B-W. *Bacillus aryabhatai* SRB02 tolerates oxidative and nitrosative stress and promotes the growth of soybean by modulating the production of phytohormones. *PLoS One*, v. 12, n. 3, p. e0173203, 2017. 10.1371/journal.pone.0173203
- POUDEL, M.; MENDES, R.; COSTA, L. A. S.; BUENO, C. G.; MENG, Y.; FOLIMONOVA, S. Y.; GARRETT, K. A.; MARTINS, S. J. The role of plant-associated bacteria, fungi, and

- viruses in drought stress mitigation. *Frontiers in Microbiology*, v. 12, 743512, 2021. 10.3389/fmicb.2021.743512.
- PRASAD, P. V. Vara; STAGGENBORG, Scott A.; RISTIC, Zoran. Impacts of drought and/or heat stress on physiological, developmental, growth, and yield processes of crop plants. *Journal of Agronomy and Crop Science*, Berlin, v. 194, n. 3, p. 181–195, 2008.
- SAAD, M. M. A.; ABO-KOURA, H. A. Improvement of Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) growth and yield under drought stress by inoculation with *Bacillus cereus* and foliar application of potassium silicate. *Environmental, Biodiversity and Soil Security*, v. 2, 16, 2018. 10.21608/jenvbs.2019.6790.1045
- SANTOS, O. O.; FALCÃO, H.; ANTONINO, A. C. D.; LIMA, J. R. S.; LUSTOSA, B. M.; SANTOS, M. G. Desempenho ecofisiológico de milho, sorgo e braquiária sob déficit hídrico e reidratação. *Bragantia*, v. 73, n. 2, 2014. 10.1590/brag.2014.018
- SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998. 10.1590/1807-1929/agriambi.v2n3p287-294
- SILVA, A. A. F.; TOLEDO, N. L. P.; VIEIRA, R. C. Potencial dos bioinsumos na agricultura sustentável. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 12, n. 3, p. 145-160, 2025. 10.52138/sitec.v5i1.523
- SILVA, A.; F., D. H.; SOUZA, R. A.; COSTA, C. A. RIGHI. Rotação de culturas e sustentabilidade agrícola. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 59, p. e02652, 2024.
- SILVA, G. F.; CALONEGO, J. C.; LUPERINI, B. C. O.; CHAMMA, L.; ZANETTI, W. A. L.; BORGHI, E.; PARRELLA, R. A.; PUTTI, F. F. Soil management and nitrogen fertilization of biomass sorghum modulate physiological and biochemical responses in soybean grown in succession. *European Journal of Agronomy*, v. 158, 127206, 2024. v. 10.1016/j.eja.2024.127206.
- SINGH, V.; VAN OOSTEROM, E. J.; JORDAN, D. R.; MESSINA, C. D.; COOPER, M.; HAMMER, G. L. Morphological and architectural development of root systems in sorghum and maize. *Plant and Soil*, v. 333, n. 1–2, p. 287–299, 2010. 10.1007/s11104-010-0343-0
- SOLUSOLO. Bioinsumos e a redução do uso de água na agricultura. Relatório técnico, 2025. Disponível em: <https://solusolo.com.br/artigos/bioinsumos-agua-agricultura>. Acesso em: 10 de nov. 2025.

- SOUZA, I.; AGUIAR, L.; REZENDE, C. Inoculação do *Bacillus aryabhattai* e os efeitos na produtividade do milho. *Research, Society and Development*, v. 14, e10414248266, 2025. 10.33448/rsd-v14i2.48266
- SURENDRAN, U.; SANDEEP, O.; JOSEPH, E. J. The impacts of magnetic treatment of irrigation water on plant, water and soil characteristics. *Agricultural Water Management*, v. 178, p. 21-29, 2016. 10.1016/j.agwat.2016.08.016
- TABOSA, J. N.; REIS, O. V.; BRITO, A. R. M. B.; MONTEIRO, M. S. D.; SIMPLICIO, J. B.; OLIVEIRA, J. A. C.; SILVA, F. G.; AZEVETO NETO, A. D.; DIAS, F. M.; LIRA, M. A.; TAVARES FILHO, J. J.; NASCIMENTO, M. M. A.; LIMA, L. E.; CARVALHO, H. W. L.; OLIVEIRA, L. R. Comportamento de cultivares de sorgo forrageiro em diferentes ambientes agroecológicos dos estados de Pernambuco e Alagoas. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v. 1, n. 2, p. 47-58, 2002. 10.18512/1980-6477/rbms.v1n2p47-58
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.
- SHAREEF, M.; GUI, D.; ZENG, F.; AHMED, Z.; WAQAS, M.; ZHANG, B.; IQBAL, H.; FIAZ, M. Impact of drought on assimilates partitioning associated fruiting physiognomies and yield quality attributes of desert grown cotton. *Acta Physiologiae Plantarum*, v. 40, 71, 2018. 10.1007/s11738-018-2646-3
- VARONE, L.; GRATANI, L.; BOMBIERI, G.; CARMO-SILVA, E.; FERRINI, F. Stomatal and non-stomatal limitations to photosynthesis in seedlings and saplings of Mediterranean species preconditioned and aged in nurseries: different response to water stress. *Environmental and Experimental Botany*, v. 75, n. 1, p. 235-247, 2012. 10.1016/j.envexpbot.2011.07.007
- VON PINHO, R. G.; SILVA, E. V. V.; OLIVEIRA, T. L. D.; SOUZA, V. F. D.; MENEZES, C. B. D. Breeding sorghum for grain, forage and bioenergy in Brazil. *International Journal of Maize & Sorghum*, v. 21, e1275, 2022. 10.18512/rbms2022v21e1275
- ZHANG, F.; WANG, Y.; YU, H.; ZHU, K. Effect of excessive soil moisture stress on sweet sorghum: physiological changes and productivity. *Pakistan Journal of Botany*, v. 48, p. 1-9, 2016.