



AMANDA MARTINS LIMA

**USO DE *Bacillus aryabhatai* NO CAFEIEIRO
COMO ESTRATÉGIA DE MITIGAÇÃO DOS
EFEITOS DO DÉFICIT HÍDRICO**

LAVRAS - MG

2025

AMANDA MARTINS LIMA

**USO DE *Bacillus aryabhattai* NO CAFEEIRO COMO ESTRATÉGIA
DE MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DO DÉFICIT HÍDRICO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

Prof.^a Dra. Dalysse Toledo Castanheira
Orientadora

Prof.^o Dr. Tiago Teruel Rezende
Coorientador

LAVRAS - MG

2025

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha
Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados
informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Lima, Amanda Martins.

Uso de *Bacillus aryabhatai* no cafeeiro como estratégia
de mitigação dos efeitos do déficit hídrico / Amanda Martins
Lima. - 2025.

83 p.: il.

Orientadora: Dalys Toledo Castanheira

Coorientador: Tiago Teruel Rezende

Dissertação (Mestrado Acadêmico - Universidade
Federal de Lavras, 2025. Bibliografia.

1. *Bacillus spp.* 2. Mudanças climáticas. 3. *Coffea arabica*
L. I. Toledo Castanheira, Dalys. II. Teruel Rezende, Tiago.
III. Universidade Federal de Lavras. IV. Título.

AMANDA MARTINS LIMA

**USO DE *Bacillus aryabhattai* NO CAFEIEIRO COMO ESTRATÉGIA DE
MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DO DÉFICIT HÍDRICO**

**USE OF *Bacillus aryabhattai* IN COFFEE AS A STRATEGY TO MITIGATE
THE EFFECTS OF WATER DEFICIT**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 31 de março de 2025.

Dra. Milene Alves de Figueiredo Carvalho	EMBRAPA
Dr. Alan Carvalho Andrade	EMBRAPA

Prof.^a Dra. Dalysse Toledo Castanheira
Orientadora

Prof.^o Dr. Tiago Teruel Rezende
Coorientador

LAVRAS - MG

2025

A Deus, pela proteção em cada desafio.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que me sustentou em momentos difíceis e me encheu de coragem, que transformou desafios em oportunidades e fortaleceu meu espírito e que me inspirou a acreditar nos meus sonhos e a perseverar.

À Nossa Senhora Aparecida, por me cercar de bênçãos e amparo em todos os momentos e que me fortalece com sua intercessão e amor.

Aos meus pais e a minha irmã, pilares da minha vida. Com o amor de vocês e sabedoria, enfrento desafios e celebro conquistas. Obrigado por estarem ao meu lado em cada passo da minha jornada.

Ao Eduardo por seu amor e companheirismo. Agradeço especialmente por sua dedicação e apoio na realização deste projeto.

À Universidade Federal de Lavras, especialmente, ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, pela oportunidade de adquirir e ampliar meus conhecimentos.

A Professora Dra. Dalys Toledo Castanheira, pela orientação valiosa, carinho e confiança, que tornaram minha jornada acadêmica ainda mais enriquecedora.

Ao Professor Dr. Tiago Teruel, agradeço pelo carinho, apoio e pelas contribuições que me guiaram em minha trajetória.

A todos do Setor de Cafeicultura, e Laboratório de Anatomia do Café pela amizade e solidariedade.

Aos meus amigos, por serem a luz nos meus dias e por cada momento especial que compartilhamos juntos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

Às empresas NOOA BRASIL, e a NITRO, pela parceria na realização do experimento.

A todos que contribuíram para a construção deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

MUITO OBRIGADA!

RESUMO

Objetivou-se, neste trabalho, avaliar uso de *Bacillus aryabhattai* no cafeeiro como estratégia para mitigar os impactos do déficit hídrico. O estudo foi realizado em casa de vegetação, situada no Setor de Cafeicultura da Universidade Federal de Lavras (UFLA), na cidade de Lavras – MG, na Região Sul de Minas, no período de março 2024 a agosto de 2024. Os fatores em estudo foram dispostos em esquema fatorial 5x4 com quatro repetições, totalizando 20 tratamentos e 80 unidades experimentais. Os tratamentos constituíram da combinação entre os níveis dos dois fatores em estudo sendo um deles as doses de inoculante a base de *Bacillus aryabhattai* (0, 1, 2, 3 e 4 mL.L⁻¹) e o outro fator composto por quatro níveis de déficit hídrico (0, 25, 50 e 75%) Foram avaliadas características morfológicas, fisiológicas, bioquímicas e anatômicas. Os níveis de déficit hídrico afetaram o crescimento, a massa seca, o potencial hídrico e a condutância estomática das plantas. *Bacillus aryabhattai* influenciou a atividade das enzimas antioxidantes e as características anatômicas, enquanto os índices de clorofila a (CIA), b (CIB) e total (CIT), não foram influenciados. Conclui-se que o déficit hídrico comprometeu o crescimento e o metabolismo das plantas de café, afetando parâmetros morfológicos, fisiológicos e bioquímicos. A inoculação com *Bacillus aryabhattai* promoveu alterações anatômicas e aumento da atividade das enzimas antioxidantes, sugerindo um mecanismo de proteção contra o estresse hídrico.

Palavras-chave: *Bacillus spp*; Mudanças climáticas; *Coffea arabica L.*

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the use of *Bacillus aryabhattai* in coffee as a strategy to mitigate the impacts of water deficit. The study was carried out in a greenhouse, located in the Coffee Growing Sector of the Federal University of Lavras (UFLA), in the city of Lavras – MG, in the South Region of Minas, from March 2024 to August 2024. The factors under study were arranged in a 5x4 factorial scheme with four replications, totaling 20 treatments and 80 experimental units. The treatments consisted of the combination of the levels of the two factors under study, one of them being the doses of inoculant based on *Bacillus aryabhattai* (0, 1, 2, 3 and 4 ml.L⁻¹) and the other factor composed of four levels of water deficit (0, 25, 50 and 75%). Morphological, physiological, biochemical and anatomical characteristics were evaluated. The levels of water deficit affected the growth, dry mass, water potential and stomatal conductance of the plants. *Bacillus aryabhattai* influenced the activity of antioxidant enzymes and anatomical characteristics, while the chlorophyll a (CIA), b (CIB) and total (CIT) indices were not impacted. It was concluded that the water deficit compromised the growth and metabolism of coffee plants, affecting morphological, physiological and biochemical parameters. Inoculation with *Bacillus aryabhattai* promoted anatomical changes and increased activity of antioxidant enzymes, suggesting a protective mechanism against water stress.

Keywords: *Bacillus spp*; Climate change; *Coffea arabica L.*

INDICADORES DE IMPACTO

O estudo investigou o uso de *Bacillus aryabhatai* na implantação de lavouras de café como estratégia para mitigar os impactos do déficit hídrico, promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis. Os resultados forneceram informações sobre a aplicação do microrganismo, seus efeitos na fisiologia, morfologia, bioquímica e anatomia das plantas. A disseminação do conhecimento ocorreu por meio de artigos científicos, fortalecendo a colaboração entre pesquisadores e empresas do setor cafeeiro. Dentre os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), o estudo integra os objetivos, 2 “Fome zero e agricultura sustentável”, 6 “Água Potável e Saneamento”, 12 “Consumo e Produção Responsáveis” e 13 “Ação Contra a Mudança Global do Clima”, visto que o uso de *Bacillus aryabhatai* na implantação de lavouras de café pode contribuir para a mitigação dos efeitos do déficit hídrico. Essa inovação biotecnológica permite uma melhor compreensão dos impactos desses microrganismos na fisiologia, morfologia, bioquímica e anatomia das plantas. O café, além de ser um produto de alto valor agregado, demanda um uso intensivo de mão de obra, sendo essencial para a geração de emprego e renda no campo. Com isso, a adoção dessa estratégia fortalece a capacidade científica e tecnológica dos países em desenvolvimento, promovendo avanços na pesquisa sobre o uso de microrganismos e possibilitando a transição para sistemas de produção mais sustentáveis, alinhados às exigências do mercado global e aos desafios climáticos atuais. Entre as áreas temáticas da Política Nacional de Extensão, o trabalho impacta na comunicação (1) divulgação científica e transferência de conhecimento para produtores e técnicos do setor, meio ambiente (5) promoção da sustentabilidade na produção agrícola e uso eficiente de recursos naturais, tecnologia e produção (8) desenvolvimento e aplicação de biotecnologias para otimizar o cultivo do café. Com isso é possível promover a transferência de conhecimento, a sustentabilidade e a aplicação de biotecnologias na cafeicultura.

IMPACT INDICATORS

The study investigated the use of *Bacillus aryabhatai* in the implementation of coffee plantations as a strategy to mitigate the impacts of water deficit, promoting more sustainable agricultural practices. The results provided information about the application of the microorganism, its effects on the physiology, morphology, biochemistry and anatomy of the plants. The dissemination of knowledge occurred through scientific articles, strengthening the collaboration between researchers and companies in the coffee sector. Among the 17 Sustainable Development Goals (SDGs) of the United Nations (UN), the study integrates the goals, 2 "Zero hunger and sustainable agriculture", 6 "Drinking Water and Sanitation", 12 "Responsible Consumption and Production" and 13 "Action Against Global Climate Change",

since the use of *Bacillus aryabhatai* in the implementation of coffee crops can contribute to the mitigation of the effects of water deficit, this biotechnological innovation allows a better understanding of the impacts of these microorganisms on the physiology, morphology, biochemistry and anatomy of plants. Coffee, in addition to being a high value-added product, requires intensive use of labor, being essential for the generation of employment and income in the field. As a result, the adoption of this strategy strengthens the scientific and technological capacity of developing countries, promoting advances in research on the use of microorganisms and enabling the transition to more sustainable production systems, in line with the requirements of the global market and current climate challenges. Among the thematic areas of the National Extension Policy, the work impacts on communication (1) scientific dissemination and knowledge transfer to producers and technicians in the sector, environment (5) promotion of sustainability in agricultural production and efficient use of natural resources, technology and production (8) development and application of biotechnologies to optimize coffee cultivation. With this, it is possible to promote knowledge transfer, sustainability and the application of biotechnologies in coffee growing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Representação gráfica das variáveis climatológicas registradas mensalmente no ano 2024.	31
Figura 2- Gráfico de regressão de ajuste da altura das plantas em função dos níveis do déficit hídrico.	41
Figura 3 - Gráfico de regressão de ajuste do diâmetro do caule em função dos níveis do déficit hídrico.	42
Figura 4- Gráfico de regressão de ajuste da massa seca da parte aérea em função dos níveis do déficit hídrico.....	43
Figura 5 - Gráfico de regressão de ajuste da massa seca das raízes em função dos níveis do déficit hídrico.....	44
Figura 6 - Gráfico de regressão de ajuste da massa seca total em função dos níveis do déficit hídrico.	45
Figura 7 - Gráfico de regressão de ajuste do potencial hídrico em função dos níveis do déficit hídrico.	46
Figura 8 - Gráfico de regressão da condutância estomática em função dos níveis de déficit hídrico. .	47
Figura 9 - Gráfico de regressão de ajuste da catalase em função das concentrações de <i>B. aryabhatai</i>	48
Figura 10- Gráfico de regressão de ajuste da ascorbato peroxidase em função das concentrações de <i>B. aryabhatai</i>	49
Figura 11 - Gráfico de regressão de ajuste da ascorbato peroxidase em função dos níveis de déficit hídrico.....	50
Figura 12 - Ajuste de regressão para peroxidação lipídica em função das concentrações de <i>Bacillus aryabhatai</i>	52
Figura 13 - Gráfico de regressão de ajuste da peroxidação lipídica em função dos níveis de déficit hídrico.....	52
Figura 14- Gráfico de regressão de ajuste da quantificação do ascorbato em função das concentrações de <i>Bacillus aryabhatai</i> aos níveis de déficit hídrico.....	53
Figura 15 - Desdobramento de concentração de <i>B. aryabhatai</i> dentro dos níveis de déficit hídrico..	54
Figura 16 - Desdobramento de concentração de <i>B. aryabhatai</i> dentro dos níveis de déficit hídrico..	55
Figura 17 - Desdobramento de concentração de <i>B. aryabhatai</i> dentro dos níveis de déficit hídrico..	56
Figura 18 - Desdobramento de concentração de <i>B. aryabhatai</i> dentro dos níveis de deficit hídrico..	57
Figura 19 - Desdobramento de concentração de <i>B. aryabhatai</i> dentro dos níveis de déficit hídrico..	58
Figura 20 - Desdobramento de concentração de <i>B. aryabhatai</i> dentro dos níveis de déficit hídrico..	59
Figura 21 - Gráfico de regressão da área da medula em função dos níveis de deficit hídrico.	60
Figura 22 - Desdobramento de concentração de <i>B. aryabhatai</i> dentro dos níveis de déficit hídrico..	61

- Figura 23 - Desdobramento de concentração de *B. aryabhatai* dentro dos níveis de déficit hídrico.. 62
- Figura 24 - Desdobramento de concentração de *B. aryabhatai* dentro dos níveis de déficit hídrico.. 63
- Figura 25 - Desdobramento de concentração de *B. aryabhatai* dentro dos níveis de déficit hídrico.. 64
- Figura 26 - Desdobramento de concentração de *B. aryabhatai* dentro dos níveis de déficit hídrico.. 65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Análise química (camada do solo de 0-20), antes da instalação do experimento. Lavras - MG, 2023.	32
Tabela 2- Distribuição de Tratamentos com Doses Variáveis de Inoculação de <i>Bacillus aryabhatai</i> em Diferentes Níveis de Déficit Hídrico.	34

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	15
1 INTRODUÇÃO	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 Estresse hídrico e seus efeitos na planta de café	16
2.2 Alterações morfofisiológicas em cafeeiros sob condições de estresse hídrico	17
2.3 Estresse oxidativo e mecanismo de defesa antioxidante em plantas de café	18
2.4 Influência das rizobactérias na melhora da tolerância da escassez hídrica	20
2.5 <i>Bacillus aryabhatai</i>	21
REFERÊNCIAS	23
SEGUNDA PARTE – ARTIGO	29
1 INTRODUÇÃO	29
2 MATERIAIS E MÉTODOS	31
2.1 Caracterização da área experimental	31
2.2 Instalação e condução do experimento	32
2.3 Delineamento experimental e tratamentos	34
2.4 Características avaliadas	35
2.4.1 Características morfológicas.....	35
2.4.2 Características fisiológicas.....	36
2.4.3 Características Bioquímica	36
2.4.3.1 Metabolismo antioxidante.....	37
2.4.3.2 Quantificação de peróxido de hidrogênio (H ₂ O ₂) e peroxidação lipídica (PL).....	38
2.4.3.3 Quantificação do Ascorbato	38
2.4.4 Características anatômicas	39
2.5 Análise estatística.....	40
4.0 RESULTADOS	41
4.1 Características morfológicas.....	41
4.1.2 Diâmetro de caule	42
4.1.2 Massa Seca.....	43
4.1.3.1 Massa seca da parte aérea (MSPA).....	43
4.2 Características fisiológicas.....	46
4.2.1 Potencial Hídrico	46
4.3 Características bioquímicas.....	48
4.3.1.3 Superóxido dismutase (SOD).....	51
4.3.1.4 Quantificação de peróxido de hidrogênio (H ₂ O ₂) e peroxidação lipídica (PL).....	51
4.3.1.4.1 Quantificação de peróxido de hidrogênio (H ₂ O ₂).....	51
4.3.1.4.2 Peroxidação lipídica (PXL).....	51
4.4 Características anatômicas	54
4.4.2 Área dos vasos do metaxilema (AMET)	56

4.4.3	Área do floema (AF)	57
4.4.4	Área do xilema (AX)	58
4.4.5	Frequência de vasos do xilema (FVX)	59
4.4.6	Área da medula (AM)	60
4.4.6	Raio dos vasos (RV)	61
4.4.7	Diâmetro de vaso (DV)	62
4.4.9	Índice de vulnerabilidade do xilema (IVX)	63
4.4.10	Condutividade hidráulica do xilema (CHX)	64
4.4.11	Número de vasos do xilema (NVX)	65
4	DISCUSSÃO	66
5	CONCLUSÕES	74
	REFERÊNCIAS	76
	TERCEIRA PARTE	81
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	81

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas já exercem influência sobre a produção agrícola em nível global e devem se tornar ainda mais intensas nas próximas décadas. Assim, torna-se fundamental compreender esses impactos e criar estratégias para mitigar seus efeitos, além de promover a adaptação no setor agrícola (FREITAS, 2024, LIU *et al.*, 2016).

O Brasil destaca-se como o maior produtor e exportador mundial de café, sendo essa cultura de extrema importância para a economia do país. Além de seu impacto econômico, o café possui grande relevância agrônômica, dado o papel do Brasil como líder na produção global (MANTOVANI *et al.* 2022).

As alterações climáticas globais representam o desafio mais significativo a ser enfrentado no século XXI, dado que seus efeitos, geralmente negativos, serão percebidos de maneira diferenciada entre as distintas atividades econômicas de regiões ao redor do mundo (CARLOS *et al.*, 2019)

Dentre das mudanças climáticas, a escassez de água é um dos principais fatores do ambiente que restringem o desenvolvimento e a eficiência produtiva das culturas agrícolas nas safras futuras. A capacidade de adaptação das plantas à escassez de água é um processo complexo, pois implica em mudanças morfológicas, fisiológicas, bioquímicas e moleculares (PELOSO *et al.*, 2017).

O cafeeiro é uma cultura de grande relevância tanto para o Brasil quanto para o mundo, mas sua produção enfrenta desafios crescentes devido às mudanças ambientais. Entre os principais fatores está a irregularidade das chuvas, cada vez mais frequente, que provoca déficits hídricos significativos (SILVIA, 2023, CUNHA *et al.*, 2019).

Entre as estratégias para reduzir o estresse hídrico nas culturas, destaca-se o uso de bactérias promotoras do crescimento vegetal (BPCVs) que vêm sendo amplamente investigadas por pesquisadores (FIGUEIRA, 2024). Essas bactérias, associadas à rizosfera de plantas, representam um conjunto de microrganismos benéficos que desempenham um papel crucial no desenvolvimento de várias espécies vegetais, com destaque para aquelas do gênero *Bacillus spp.* (EMBRAPA, 2019).

A bactéria *Bacillus aryabhatai* é uma espécie relativamente recente de rizobactérias gram-positivas em forma de bastonete, que foi isolada e identificada pela primeira vez em 2009, na rizosfera do Mandacaru (*Cereus jamacaru*), um cacto típico

da região da Caatinga (MAY *et al.*, 2021). As estirpes de *Bacillus aryabhatai* têm demonstrado capacidade de atenuar os efeitos adversos do estresse hídrico nas plantas, além de promover um crescimento vegetal significativo (EMBRAPA, 2017).

Pesquisas realizadas pela Embrapa apontaram que essas rizobactérias impactam positivamente diversos mecanismos de tolerância ao estresse, contribuindo para a melhoria dos processos celulares durante a biorremediação do estresse (VIEIRA *et al.*, 2021).

No entanto, não há estudos que abordam o potencial dessa bactéria na cafeicultura em função do déficit hídrico.

Portanto, objetivou-se neste trabalho, avaliar os efeitos do uso de *Bacillus aryabhatai* no cafeeiro como estratégia de mitigação dos efeitos do déficit hídrico

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Estresse hídrico e seus efeitos na planta de café

A cultura do cafeeiro está sujeita a diversos estresses ambientais, sendo que o déficit hídrico é considerado um dos mais prejudiciais, pois afeta negativamente o crescimento, desenvolvimento e produtividade dessa planta (SOUZA *et al.*, 2015).

Souza *et al* (2015) ainda citaram que, quando exposta a condições de escassez hídrica, toda planta aciona mecanismos de sobrevivência para lidar com o estresse. A primeira resposta é a redução da abertura estomática, como uma forma de limitar a perda excessiva de água.

No cafeeiro, a deficiência parcial de água durante períodos críticos se manifesta nas folhas por meio da perda de turgescência e clorose. Em situações de estresse hídrico intenso, observa-se a redução do crescimento dos ramos ortotrópicos, a morte das raízes superficiais e a senescência de folhas e flores (CINTRA *et al*, 2020, CARARO, 2015).

Rocha *et al.* (2021) concluíram que a escassez de água no solo compromete a absorção hídrica e de nutrientes pelas raízes do cafeeiro. A limitação hídrica afeta diretamente a turgidez celular, reduzindo a taxa fotossintética. Além disso, a deficiência de nutrientes, como potássio, provocada pelo estresse hídrico, pode levar à queda de folhas, diminuindo a área fotossinteticamente ativa e agravando ainda mais a redução da fotossíntese. Micronutrientes como o boro também podem se tornar deficientes nessas condições, impactando negativamente o crescimento e a produtividade da planta.

A distribuição irregular e insuficiente das chuvas pode levar ao déficit hídrico

nos cafeeiros, especialmente quando associada ao aumento da temperatura ambiente. Esse déficit de água pode provocar mudanças no metabolismo das plantas. Uma das principais alterações ocorre nas trocas gasosas, já que, em condições de estresse hídrico, há perda de turgor celular, o que leva ao fechamento dos estômatos (parcial ou total) como uma forma de minimizar a perda de água por transpiração. Contudo, essa resposta também reduz a absorção de CO₂, vital para a produção de carboidratos, gerando limitações tanto nas trocas gasosas quanto nas reações bioquímicas (LINHARES, 2021; PELOSO *et al.*, 2017; SANCHES *et al.*, 2017; MENEZES-SILVA *et al.*, 2017).

Um fator afetado pela baixa disponibilidade de água no solo é o potencial hídrico do cafeeiro, que diminui à medida que a restrição hídrica se agrava, especialmente quando associada ao aumento da temperatura e da intensidade luminosa (LINHARES, 2021, SILVA *et al.*, 2015; RONCHI *et al.*, 2015; SILVEIRA *et al.*, 2016). Assim, há uma diminuição significativa na quantidade de água nas folhas conforme os níveis hídricos do solo caem, sugerindo que o protoplasma das células sofre desidratação, o que afeta negativamente o crescimento celular (LINHARES, 2021, PELOSO *et al.*, 2017).

As alterações metabólicas no cafeeiro provocadas pelo déficit hídrico resultam em limitações ao seu crescimento e desenvolvimento. Sob condições de seca, essas plantas apresentam redução na altura, menor produção de massa seca tanto na parte aérea quanto nas raízes, além de diminuições no diâmetro do caule e na área foliar (LINHARES, 2021, DOMINGHETTI *et al.*, 2016; RIBEIRO *et al.*, 2017; CAMPOS *et al.*, 2019) onde pode se resultar em uma redução na produtividade do cafeeiro (LINHARES, 2021, ALVES *et al.*, 2011; DaMATTA *et al.*, 2018).

2.2 Alterações morfofisiológicas em cafeeiros sob condições de estresse hídrico

As modificações morfofisiológicas decorrentes do déficit hídrico têm o potencial de alterar significativamente a maneira como as plantas lidam com o estresse abiótico (TORRE *et al.*, 2021). Aspectos como a disponibilidade de água, as condições de iluminação e a temperatura estão intimamente associados à regulação da atividade fotossintética nas plantas (MORAIS *et al.*, 2003). O estresse hídrico exerce um efeito negativo sobre os processos fisiológicos, resultando em uma diminuição nas taxas de fotossíntese devido a restrições na condutância dos estômatos (FLEXAS *et al.*, 2006; ZHOU *et al.*, 2013).

A taxa de transpiração, que varia de acordo com a disponibilidade hídrica à qual a cultura está exposta, demonstra que a planta pode ativar mecanismos de defesa contra a perda de água em condições de baixa umidade do solo. Embora essa resposta possa impactar negativamente o crescimento e o desenvolvimento vegetativo, ela é essencial para a sobrevivência, desde que o déficit hídrico não seja muito intenso e duradouro (SOARES, 2022; MELO *et al.*, 2014).

Cafeeiros arábica podem ser gravemente afetados pela insuficiência de água, resultando em quedas de 43 a 46% na fotossíntese líquida e de 52 a 60% na condutância estomática (SOARES, 2022; CAVATTE *et al.*, 2012).

Diversos estudos destacam a importância do controle estomático na regulação do estado hídrico do cafeeiro, evidenciando uma ligação direta com o potencial hídrico da planta (REIS, ANDRÉ MORA, 2014; ESPINHEIRO *et al.*, 2005; PRAXEDES *et al.*, 2006; SILVA *et al.*, 2010). Em fases iniciais de menor disponibilidade de água no solo, as plantas respondem fechando os estômatos como uma forma de limitar a perda de água para a atmosfera. Porém, essa medida aumenta a barreira para a entrada de CO₂ no sítio de carboxilação da Rubisco, o que pode comprometer a taxa de fotossíntese, conforme relatado em diversos estudos envolvendo *Coffea arabica* (REIS, ANDRÉ MORA, 2014; MATTA; MAESTRI; BARROS, 1997; CAI *et al.*, 2005; SILVA *et al.*, 2006).

Em condições de escassez hídrica, é possível observar uma diminuição no tamanho dos estômatos das plantas, o que pode ser considerado favorável, pois resulta em uma redução na transpiração, diminuindo assim a perda de água e melhorando a eficiência do seu uso (SOARES, 2022; GRISI *et al.*, 2008; BATISTA *et al.*, 2010).

O potencial hídrico do cafeeiro é igualmente impactado pela escassez de água no solo; à medida que a severidade da restrição hídrica aumenta, os valores do potencial hídrico diminuem (tornando-se mais negativos). Isso é especialmente evidente quando há um aumento na temperatura e na luminosidade (SOARES, 2022; SILVA *et al.*, 2015; RONCHI *et al.*, 2015; SILVEIRA *et al.*, 2016).

Durante a etapa bioquímica, a limitação hídrica pode provocar a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), que podem comprometer o sítio catalítico da enzima Rubisco, resultando em uma redução de sua atividade funcional (REIS, ANDRÉ MORA, 2014; KANECHI *et al.*, 1996; IRVING; ROBINSON, 2006).

2.3 Estresse oxidativo e mecanismo de defesa antioxidante em plantas de café

Quando as plantas são submetidas a diferentes tipos de estresse, seja de origem biótica ou abiótica, ocorre um desequilíbrio interno que leva ao aumento na geração de EROs, como superóxido (O_2^-), peróxido de hidrogênio (H_2O_2), oxigênio singlete (1O_2) e radicais hidroxila (OH), resultando no chamado estresse oxidativo (MATOS, 2021; DAS; ROYCHOUDHURY, 2014; FOYER; NOCTOR, 2005).

As EROs podem ter tanto efeitos prejudiciais quanto benéficos nas plantas, dependendo da sua concentração. Em altas concentrações, elas podem causar danos celulares, enquanto em níveis mais baixos, podem funcionar como mensageiros ou sinalizadores em plantas que enfrentam algum tipo de estresse (MILLER *et al.*, 2010; SHARMA *et al.*, 2012).

As plantas adotam diversas estratégias de defesa para proteger suas células e prevenir a morte celular causada pelo excesso de EROs, que resulta em estresse oxidativo (ASADA, 1999). As superóxidos dismutases (SOD) são uma das principais enzimas antioxidantes que desempenham um papel crucial na detoxificação das EROs. Elas catalisam a transformação do O_2^- em H_2O_2 e são consideradas a primeira linha de defesa contra as EROs (CURVÊLO *et al.*, 2013; ALSCHER *et al.*, 2002). As catalases (CAT) são enzimas que desempenham a função de converter o H_2O_2 em água H_2O e oxigênio (O_2) (ASADA, 1999). As enzimas pertencentes ao ciclo ascorbato-glutationa, como as ascorbato peroxidases (APX), desempenham um papel importante na redução do H_2O_2 nos plastídios, utilizando o ascorbato como doador de elétrons, e o ascorbato oxidado é reduzido pela glutatona reduzida (GSH), que é derivada da glutatona oxidada (GSSG), por meio da ação da glutatona redutase (GR) (CURVÊLO *et al.*, 2013; YAN *et al.*, 1996).

Pesquisas revelam que, em situações de deficiência hídrica, as plantas de café apresentam um aumento na produção de EROs (MATOS, NAGLA MARIA SAMPAIO DE, 2021; DAMATTA *et al.*, 2018; LIMA *et al.*, 2002; PINHEIRO *et al.*, 2004). Esse aumento pode resultar em lesões celulares, comprometendo ácidos nucleicos, inibindo a atividade enzimática, causando peroxidação lipídica, oxidando proteínas e, caso não sejam neutralizadas, ativando a via de morte celular (KAN *et al.*, 2010).

O conhecimento a respeito do balanço das atividades do sistema de defesa antioxidante enzimático e não enzimático, bem como os níveis de EROs e produtos gerados durante o estresse secundário, são importantes para o entendimento da dinâmica da tolerância das plantas à seca (BARBOSA *et al.*, 2023).

2.4 Influência das rizobactérias na melhora da tolerância da escassez hídrica

Para lidar com o déficit hídrico e as altas temperaturas, as plantas desenvolvem adaptações estruturais que visam minimizar a perda de água, embora restrinjam o crescimento vegetal (JESUS *et al.*, 2022; DUQUE *et al.*, 2013). Entre essas estratégias estão a redução da área foliar, o fechamento dos estômatos (OSAKABE *et al.*, 2014), o aumento da densidade de tricomas na face inferior das folhas, alterações na permeabilidade da cutícula e a queda foliar (CHAVES; FLEXAS & PINHEIRO, 2009; XOCONOSTLE-CAZARES *et al.*, 2010). Tais mudanças comprometem a estrutura do mesofilo e, conseqüentemente, o desenvolvimento da planta. (JESUS *et al.*, 2022; DUQUE *et al.*, 2013).

Nesse cenário, as Rizobactérias promotoras do crescimento de plantas (RPCPs) têm se mostrado uma alternativa eficaz para mitigar os impactos adversos causados pela escassez de água. Elas atuam por meio da síntese de substâncias, como auxinas e citocininas, que ajudam a minimizar o estresse e contribuem para um desenvolvimento estrutural mais eficiente das plantas (KUMAR, PRAKASH & JOHRI, 2011).

As bactérias promotoras do crescimento vegetal (BPCVs) englobam um grupo de microrganismos procariontes diazotróficos capazes de colonizar os tecidos e células das plantas. Essa interação estimula o crescimento vegetal por diversos mecanismos (MARQUES *et al.*, 2020). As BPCVs desempenham funções importantes, como a produção de metabólitos e fitohormônios, incluindo a auxina, que favorece o crescimento das raízes e da parte aérea, melhorando a absorção de água e nutrientes. Além disso, contribuem para a mitigação de estresses bióticos e abióticos e podem estabelecer associações tanto externas quanto endofíticas com as plantas (BESEN *et al.*, 2019).

A interação com bactérias pode estimular as plantas a sintetizarem compostos osmorreguladores, favorecendo uma ação conjunta que fortalece a tolerância à seca. Essas bactérias também são capazes de produzir auxinas, como o ácido indolacético, que estimulam o crescimento das raízes, ampliando a capacidade de absorção de água e nutrientes do solo pelas plantas (FILGUEIRAS *et al.*, 2015).

A introdução das BPCVs pode ajudar a normalizar o desempenho das plantas em condições de estresse, preservando ou aumentando o rendimento (BENSALIM *et al.*, 1998).

Certas espécies de BPCVs podem estar relacionadas à tolerância a estresses abióticos, estimulando ou mediando essa resposta por meio da produção de substâncias osmorreguladoras. Além do ajuste osmótico, esses microrganismos podem influenciar o fechamento e abertura dos estômatos, assim como modificar a morfologia e a histologia dos tecidos vegetais. Isso contribui para a tolerância ao déficit hídrico. Um exemplo é a produção de glicina-betaína por bactérias osmotolerantes, que pode atuar em sinergia com compostos produzidos pela planta em resposta ao estresse (DIMKPA *et al.*, 2009).

Conforme Mascarenhas (2021), plantas tratadas com BPCVs apresentam aumento na tolerância a estresses ambientais, incluindo déficits hídricos. Uma hipótese para isso é que as bactérias que contêm a enzima 1-aminociclopropano-1-carboxilato (ACC) desaminase ajudam na proteção das plantas contra níveis elevados de etileno, hormônio que tende a se acumular durante o estresse. A principal função dessa enzima é catalisar a clivagem do ACC, que é o precursor do etileno, reduzindo a produção desse hormônio e atenuando os efeitos negativos do estresse (MASCARENHAS, 2021; GLICK *et al.*, 1998; 2012; 2014; FORCHETTI *et al.*, 2007).

2.5 *Bacillus aryabhattai*

Bactérias da espécie *Bacillus aryabhattai* têm a capacidade de reduzir os impactos do estresse hídrico e de promover de forma significativa o crescimento de plantas (EMBRAPA, 2017). Quando presentes nas raízes de plantas sob condições de seca, elas produzem compostos que ajudam a reter água nas raízes, melhorando a adaptação ao déficit hídrico (EMBRAPA, 2019).

Pesquisas demonstram que essa rizobactéria influencia significativamente vários mecanismos de tolerância ao estresse, aprimorando a capacidade das células das plantas para enfrentar condições adversas. Um desses mecanismos envolve a produção de solutos compatíveis, como a betaína, que ajuda as plantas a se ajustar a ambientes difíceis. Além disso, essas rizobactérias formam biofilmes, estruturas multicelulares que aderem à superfície das raízes, através da produção de glicanos, proteínas e DNA conjunto. Esses biofilmes fortalecem os processos celulares, facilitando uma melhor resposta ao estresse. Estudos indicam que essas rizobactérias têm um impacto notável em vários mecanismos de resistência ao estresse, como nas bactérias do gênero *Bacillus aryabhattai*, reduzindo os efeitos do estresse hídrico e promovendo um crescimento

mais vigoroso das espécies vegetais (GRANHA *et al.*, 2024; EMBRAPA, 2017).

A espécie *Bacillus aryabhatai* foi isolada na rizosfera em várias regiões do mundo. No Brasil, essa bactéria demonstrou capacidade de promover o crescimento de plantas de milho em condições de estresse hídrico, devido à sua habilidade de formar biofilmes e à produção de exopolissacarídeos. Esses exopolissacarídeos protegem as plantas contra os efeitos adversos da falta de água (NDOUNG, 2019; KAVAMURA, 2012). O biofilme formado por *B. aryabhatai* consiste em uma aglomeração de células microbianas envoltas por substâncias poliméricas extracelulares (EPS), que desempenham um papel crucial na proteção da planta e na adaptação ao ambiente (KOKARE, 2009).

O *Bacillus aryabhatai* tem a capacidade de minimizar os impactos causados por longos períodos de estiagem, contribuindo para a redução de riscos e o aumento do potencial produtivo das lavouras (Embrapa, 2021). Além disso, pesquisas indicam que o uso desta rizobactéria promoveu aumentos significativos na produtividade de milho, soja e trigo em regiões de baixa precipitação. Quando aplicado em lavouras irrigadas, o uso do inoculado reduziu substancialmente a necessidade de irrigação, economizando água consideravelmente (MELO, 2022).

O genoma desta bactéria foi sequenciado e possui um tamanho de 3.656.253 pares de base. Este genoma inclui 126 genes envolvidos em respostas a diferentes estresses, como estresse hídrico, radiação ultravioleta e salinidade. Além disso, existem outros seis genes dedicados à biossíntese de auxinas, que desempenham um papel crucial na promoção do crescimento e na proteção contra os efeitos adversos da seca (OLIVEIRA *et al.*, 2024; MELO *et al.*, 2019).

Os estudos de Oliveira *et al.* (2024) e Lee *et al.* (2012) destacam a capacidade do *Bacillus aryabhatai* de promover o crescimento das plantas, contendo diversos fitohormônios como ácido indol-3-acético (AIA), giberelina e ácido abscísico. Além disso, Fuga (2021) relata que essa rizobactéria proporciona múltiplos benefícios ao desenvolvimento das plantas. Entre eles, destaca-se o desenvolvimento radicular, a produção de substâncias protetoras e hidratantes (como exopolissacarídeos), a otimização do uso de água pela planta e a síntese de ACC desaminase.

Não há registros na literatura sobre o uso de *Bacillus aryabhatai* em cafeeiros, o que evidencia a originalidade deste trabalho. A aplicação da bactéria nessa cultura representa uma abordagem inovadora, ampliando o conhecimento sobre seu potencial como microrganismo promotor de crescimento em condições de estresse hídrico, com

relevância para a cafeicultura em cenários de escassez de água.

REFERÊNCIAS

- ALSCHER, R.G.; ERTURK, N.; HEATH, I.S. Role of superoxide dismutases (SOD) in controlling oxidative stress in plants. **Journal of Experimental Botany**, v.53, p.1331-1341, 2002.
- ALVES, J. D. *et al.* Source-sink manipulations in *Coffea arabica* L. and its effect on growth of shoots and root system. **Ciência e agrotecnologia**. v. 35, n. 5, p. 956 -964, 2011.
- ASADA, K. The water-water cycle in chloroplasts: Scavenging of Active Oxygen and Dissipation of Excess Photons. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v.50, p.601-639, 1999.
- BARBOSA, M. R., SOUZA, L. M. DE, & NASCIMENTO, K. R. P. R. O estresse oxidativo por seca em plantas. **Multidisciplinary Sciences Reports**, v. 3, n.3, 2023.
- BATISTA, L. A. *et al.* Anatomia foliar e potencial hídrico na tolerância de cultivares de café ao estresse hídrico. **Ciência Agrônômica, Fortaleza**, v. 41, n. 3, p. 475-481, 2010.
- BENSALIM, S., NOWAK, J., ASIEDU, S.K. A plant growth promoting rhizobacterium and temperature effects on performance of 18 clones of potato. **Am. J. Potato Res.** 75, 145–152. 1998.
- BESEN, M. R. *et al.* Produtividade do milho em resposta à inoculação com *Azospirillum brasilense* e adubação nitrogenada em clima subtropical. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 18, n. 2, p. 257-268, 2019.
- CAI, Z. Q. *et al.* Responses of two field-grown coffee species to drought and re-hydration. **Photosynthetica**, Prague, v. 43, n. 2, p. 197-193, 2005.
- CAMPOS, C. N. *et al.* Melatonin reduces oxidative stress and promotes drought tolerance in Young *Coffea arabica* L. plants. **Agricultural Water Management**. v. 211, p. 37-47, 2019.
- CARARO, D. C.; DIAS, A. F. S. Café na Amazônia: Irrigação em cafeeiros. Brasília: **EMBRAPA**. 311p. 2015.
- CARLOS, S. DE M., DA CUNHA, D. A., PIRES, M. V. Does knowledge about climate change imply adaptation. Analysis of farmers in Northeast Brazil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**. n.3, v. 57. p. 455-471, 2019.
- CAVATTE, P. C. *et al.* Could shading reduce the negative impacts of drought on coffee: a morphophysiological analysis. **Physiologia Plantarum, Copenhagen**, v. 144, n. 2, p. 111- 122, 2012.
- CHAVES, M. M.; FLEXAS, J.; PINHEIRO, C. Photosynthesis under drought and salt

stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. **Annals of Botany**, v. 103, n.4, p- 551-560. 2009.

CINTRA, P.H.N. *et al.* Análise de fluorescência da clorofila a em mudas de cafeeiro sob estresse hídrico. **Braz. J. of Develop.**, Curitiba, v. 6, n. 5, p.27006-27014, may. 2020.

CUNHA, A. P. M. *et al.* Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. **Atmosphere, Basel, CH.** v.10, p. 642, 2019.

CURVÊLO, C. R. DA S. *et al.* Trocas gasosas e estresse oxidativo em plantas de algodoeiro supridas com silício e infectadas por *Ramularia areola*. **Bragantia**, 72(4), 346–359. 2013.

DAMATTA, F. M. *et al.* Physiological and agronomic performance of the coffee crop in the context of climate change and global warming: a review. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. v. 66, n. 21, p. 5264-5274, 2018.

DAS, K.; ROYCHOUDHURY, A. Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants. **Frontiers in environmental science**, [S.l.], v. 2, p. 53, 2014.

DIMKPA, C; WEINAND, T.; ASCH, F. Plant–rhizobacteria interactions alleviate abiotic stress conditions. **Plant, cell&environment**, v. 32, n. 12, p. 1682-1694, 2009.

DOMINGHETTI, A. W. *et al.* Tolerância ao déficit hídrico de cafeeiros produzidos por estaquia e embriogênese somática. **Coffee Science**. v. 11, n. 1, p. 117 - 126, 2016.

DUQUE, A. S. *et al.* Abiotic stress responses in plants: unraveling the complexity of genes and networks to survive. In: Vahdati, K.; Leslie, C. (eds). **Abiotic stress - plant responses and applications in agriculture**. 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Cientistas usam bactérias para ajudar plantas a resistir à seca. **Embrapa**, 2017

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Isolamento e Potencial Uso de Bactérias do Gênero *Bacillus* na Promoção de Crescimento de Plantas em Condições de Déficit Hídrico. **Embrapa**, 2019.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Bactéria encontrada no mandacaru vira bioproduto que promove tolerância à seca em plantas. **Embrapa**, 2021.

FILGUEIRAS, L.M.B.; MENESES, C.H.S.G. Efeito das bactérias promotoras de crescimento de plantas na proteção contra o estresse hídrico. **Journal of Biology & Pharmacy**, Campina Grande, v.11, n.1, p.2130, 2015.

FLEXAS, J. *et al.* Decreased Rubisco activity during water stress is not induced by decreased relative water content but related to conditions of low stomatal conductance and chloroplast CO₂ concentration. **New Phytol.**, [S.l.], v. 172, p. 73-82, 2006.

- FORCHETTI, G. *et al.* Endophytic bacteria in sunflower (*Helianthus annuus L.*): isolation, characterization, and production of jasmonates and abscisic acid in culture medium. **Appl Microbiol Biotechnol.** v.76, p. 1145 - 1152, 2007.
- FOYER, C. H.; NOCTOR, G. Oxidant and antioxidant signalling in plants: a re-evaluation of the concept of oxidative stress in a physiological context. **Plant, Cell & Environment**, [S.l.], v. 28, n. 8, p. 1056-1071, 2005.
- FREITAS, C. H. DE. Adaptação, calibração e aplicação de modelos de simulação do cafeeiro para avaliação do impacto das mudanças climáticas em condições brasileiras. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2024.
- FUGA, C. Pesquisa e desenvolvimento Nooa Brasil, AURAS. p. 27.2021.
- GLICK B. R.; PENROSE D. M.; LI J. A model for the lowering of plant ethylene concentrations by plant growth promoting bacteria. **J TheorBiol** v. 190 p; 63- 68, 1998.
- GRANHA, O. R., & NELSON DELÚ FILHO. Avaliação da germinação de sementes de soja tratadas com diferentes tipos de microrganismos. **Revista Agroveterinária Do Sul De Minas.** v.6, n.2, 18–36. 2024.
- GRISI, F. A. *et al.* Leaf anatomical evaluations in 'Catuaí' and 'Siriema' coffee seedlings submitted to water stress. **Ciência e Agrotecnologia**, [S.l.], v. 32, p. 1730-1736, 2008.
- IRVING, L. J.; ROBINSON, D. A dynamic model of Rubisco turnover in cereal leaves. **The New phytologist**, London, v. 169, n. 3, p. 493–504, 2006.
- JESUS, A.L.N. *et al.* Rizobactérias Promotoras do Crescimento de Plantas promovem ajustes anatômicos nas folhas de espécies nativas da Caatinga sob déficit hídrico. **Journal of Environmental Analysis and Progress.** v. 07, n. 02, p. 104-116. 2022.
- KAN, J. K.; HONG-MEI, W.; CHANG-HAI, J. Changes of reactive oxygen species and related enzymes in mitochondria respiratory metabolism during the ripening of peach fruit. **Agricultural Sciences in China**, [S.l.], v. 9, n. 1, p. 138-146, 2010.
- KANECHI, M. *et al.* Non-stomatal inhibition associated with inactivation of rubisco in dehydrated coffee leaves under unshaded and shaded conditions. **Plant & Cell Physiology**, Oxford, v. 37, n. 4, p. 455–460, 1996.
- KAVAMURA, V. *et al.* Screening of Brazilian cacti rhizobacteria for plant growth promotion under drought. **Microbiological Research**,v. 168, n. 4, p. 183-191, 2013.
- KOKARE, C. R. *et al.* Biofilm: Importance and applications, 2009
- KUMAR, A.; PRAKASH, A.; JOHRI, B. N. *Bacillus* as PGPR in crop ecosystem. In: Maheshwari, D. K. K. *Bacteria in Agrobiolgy: Crop Systems*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2, p. 37-59. 2011.
- LEE, S.; KA, J. O.; SONG, H. G. Growth promotion of *Xanthium italicum* by application of rhizobacterial isolates of *Bacillus aryabhatai* in microcosm soil. **The Journal of Microbiology, Seoul.** v. 50, n. 1, p. 45-49, 2012.

- LIHARES, P. C. A. Tolerância ao déficit hídrico de mudas de *Coffea arabica* L. suplementadas com magnésio foliar. Tese (Doutorado em Agronomia/Fisiologia Vegetal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras. p. 99. 2021.
- LIMA, A. L. S. *et al.* Photochemical responses and oxidative stress in two clones of *Coffea canephora* under water deficit conditions. **Environmental and experimental botany**, [S.l.], v. 47, n. 3, p. 239-247, 2002.
- LIU, X. *et al.* Effects of deficit irrigation on yield and nutritional quality of Arabica coffee (*Coffea arabica*) under different N rates in dry and hot region of southwest China. **Agricultural Water Management**, v. 172, p. 1-8, 1 Jul. 2016.
- MARQUES, D.M. *et al.* Azospirillum brasilense favors morphophysiological characteristics and nutrient accumulation in maize cultivated under two water regimes. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 19, e1152, 2020.
- MASCARANHAS, L. S. Uso de inoculantes microbiológicos para otimização do crescimento e desenvolvimento de plantas de cana-de-açúcar cultivadas sob déficit hídrico. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal, Instituto de Biologia, **Universidade Federal de Pelotas**, 2021.
- MATOS, N. M. S. de. Respostas anatomofisiológicas de clone de *Coffea canephora* submetidos ao manejo de irrigação do Cerrado do Planalto Central. 2020. 78 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2021.
- MATTA, F. M. da; MAESTRI, M.; BARROS, R. S. Photosynthetic performance of two coffee species under drought. **Photosynthetica**, Prague, v. 34, n. 2, p. 257-264, jan. 1997.
- MAY, André *et al.* Promoção de crescimento de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar inoculadas com *Bacillus aryabhattai* em diferentes frequências de irrigação. **Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente**. 2021.
- MELO, I. S. Inoculante à base de *Bacillus aryabhattai* para mitigação do estresse hídrico. **Pesquisas, avanços e futuro: o crescimento da Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) e o empenho de pesquisadores e empresas na busca pela sustentabilidade agrícola**. Tradução. Valinhos p. 85. 2022.
- MELO, S. I. *et al.* Promoção de crescimento de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar inoculadas com *Bacillus Aryabhattai* em diferentes frequências de irrigação. **Embrapa meio ambiente**, p. 14-23, 2019.
- MENEZES-SILVA, P. E. *et al.* Photosynthetic and metabolic acclimation to repeated drought events play key roles in drought tolerance in coffee. **Journal of Experimental Botany**. v. 68, n. 15, p. 4309-4322. 2017.
- MILLER, G. A. D. *et al.* Reactive oxygen species homeostasis and signalling during drought and salinity stresses. **Plant, cell & environment**, [S.l.], v. 33, n. 4, p. 453-467, 2010.
- MORAIS, H. *et al.* Características fisiológicas e de crescimento de cafeeiro sombreado

com guandu e cultivado a pleno sol. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.l.], v. 38, n. 10, p. 1131-1137, 2003.

NDOUNG, O. C. Ngo. Potencial de *Bacillus aryabhattai* para o controle de *Meloidogyne incognita* na cultura do milho. 20 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

OLIVEIRA, A. L. P. *et al.* Uso de bioinsumos como possibilidade de atenuação dos efeitos do estresse hídrico. **Observatório de la economía latinoamericana**, v. 22, n. 9, 2024.

OSAKABE, Y. *et al.* Response of to water stress. **Frontiers in Plant Science**, v.5, p. 1-8. 2014.

PELOSO, A. F.; TATAGIBA, S. D.; AMARAL, J. F. T. Limitações do crescimento vegetativo em cafeeiro arábica promovido pelo déficit hídrico. **Revista Engenharia na Agricultura**. v. 25, n. 2, p.139-147, 2017.

PINHEIRO, H. A. *et al.* Drought tolerance in relation to protection against oxidative stress in clones of *Coffea canephora* subjected to long-term drought. **Plant science**, [S.l.], v. 167, n. 6, p. 1307-1314, 2004.

REIS, A. M. Caracterização morfofisiológica de genótipos de *Coffea arabica* sob déficit hídrico. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras. p. 51. 2014.

RIBEIRO, A. F. F. *et al.* Paclobutrazol e restrição hídrica no crescimento e desenvolvimento de plantas de café. **Coffee Science**. v. 12, n. 4, p. 534 - 543, 2017.

RONCHI, C. P. *et al.* Respostas ecofisiológicas de cafeeiros 25 submetidos ao deficit hídrico para concentração da florada no Cerrado de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.50, n.1, p.24-32, 2015.

SANCHES, R. F. E.; CATARINO, I. C. A.; BRAGA, M. R.; SILVA, E. A. Influência da alta concentração atmosférica de CO₂ (\uparrow [CO₂]atm) × disponibilidade hídrica nas relações hídricas, trocas gasosas e acúmulo de carboidratos em *Coffea arabica* L. **Hoehnea**, v. 44, n. 4, p. 635- 643, 2017.

SHARMA, P. *et al.* Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. **Journal of botany**, [S.l.], v. 2012, p. 1-26, 2012.

SILVA, A. L. *et al.* Variability of water balance components in a coffe crop in Brazil. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 63, n. 2, p. 105–114. 2006.

SILVA, IGOR PEREIRA DE CASTRO E; SILVA, WELLINGTON FERRARI DA. Tolerância ao déficit hídrico na germinação de sementes de soja tratadas com *Bacillus aryabhattai*. **Revista Cerrado Agrociências**, v. 14, 2023.

SILVEIRA, H. R. de O. *et al.* Impactos da deficiência hídrica nas respostas ecofisiológicas e espectrais do cafeeiro consorciado com espécies madeireiras. **Coffee Science, Lavras**, v. 11, n. 3, p. 318-329, 2016.

SOARES, D. dos S. Morfofisiologia, anatomia foliar e produtividade de clones de café conilon no cerrado central. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras. p. 127, 2022.

SOUZA, B. P. *et al.* Expressão de genes relacionados ao metabolismo do nitrogênio em mudas de café arábica submetidas a déficit hídrico. **IX Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil. Anais.** p. 1-6, 2015.

TORRE, F.D. *et al.* Leaf morphophysiological changes induced by long-term drought in *Jatropha curcas* plants explain the resilience to extreme drought. **Journal of Arid Environments**, [S.l.], v. 185, n. 104381, p. 1-8, 2021.

VIEIRA, M. L., CUNHA, A. J. DA, & SOUZA, D. S. Organomineral associado a *Bacillus aryabhattai* como atenuador do déficit hídrico em mudas de café. Michele Luciene Vieira, Aquiles Júnior da Cunha, Daniela Silva Souza. **Revista Vitae - Educação, Saúde & Meio Ambiente**, n.1, v.9. 2021.

XOCONOSTLE-CAZARES, B. *et al.* Drought tolerance in crop plants. **American Journal of Plant Physiology**, v.5, n.5, p- 241-256. 2010

YAN, B.; *et al.* Flooding-induced membrane damage, lipid oxidation and activated oxygen generation in corn leaves. **Plant and Soil**, v.179, p.261-268, 1996.

ZHOU, S. *et al.* How should we model plant responses to drought. An analysis of stomatal and non-stomatal responses to water stress. **Agric. For. Meteorol.**, [S.l.], v. 182, 204-214, 2013.

SEGUNDA PARTE – ARTIGO
ARTIGO 1: MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DO DÉFICIT HÍDRICO NO
CAFEIEIRO COM O USO DE *Bacillus aryabhatai*

RESUMO

Objetivou-se, neste trabalho, avaliar uso de *Bacillus aryabhatai* no cafeeiro como estratégia para mitigar os impactos do déficit hídrico. O estudo foi realizado em casa de vegetação, situada no Setor de Cafeicultura da Universidade Federal de Lavras (UFLA), na cidade de Lavras – MG, na Região Sul de Minas, no período de março de 2024 a agosto de 2024. Os fatores em estudo foram dispostos em esquema fatorial 5x4 com quatro repetições, totalizando 20 tratamentos e 80 unidades experimentais. Os tratamentos constituíram da combinação entre os níveis dos dois fatores em estudo sendo um deles as doses de inoculante a base de *Bacillus aryabhatai* (0, 1, 2, 3 e 4 ml.L⁻¹) e o outro fator composto por quatro níveis de déficit hídrico (0, 25, 50 e 75%) Foram avaliadas características morfológicas, fisiológicas, bioquímicas e anatômicas. Os níveis de déficit hídrico afetaram o crescimento, a massa seca, o potencial hídrico e a condutância estomática das plantas. *Bacillus aryabhatai* influenciou a atividade das enzimas antioxidantes e as características anatômicas, enquanto os índices de clorofila a (CIA), b (CIB) e total (CIT), não foram impactadas. Conclui-se que o déficit hídrico comprometeu o crescimento e o metabolismo das plantas de café, afetando parâmetros morfológicos, fisiológicos e bioquímicos. A inoculação com *Bacillus aryabhatai* promoveu alterações anatômicas e aumento da atividade das enzimas antioxidantes, sugerindo um mecanismo de proteção contra o estresse hídrico.

1 INTRODUÇÃO

A escassez hídrica é um dos principais desafios para o desenvolvimento das culturas, ocasionando grandes prejuízos à produção agrícola (GARCÍA *et al.*, 2017). Devido à recorrência da seca, é fundamental desenvolver estratégias eficazes para mitigar os impactos desse estresse nas culturas (CHIAPPERO *et al.*, 2019; AHLUWALIA; SINGH; BHATIA, 2021).

A aplicação agrícola de rizobactérias promotoras de crescimento vegetal (BPCP) tem se mostrado uma estratégia eficaz para melhorar o desenvolvimento, produtividade e desempenho das culturas (PEREIRA, 2018). Além de estimular o crescimento, essas bactérias auxiliam na adaptação das plantas a condições de seca (COHEN *et al.*, 2015; SILVA, 2023). Dentre elas, destacam-se as do gênero *Bacillus*, amplamente utilizadas na agricultura por seu potencial em aumentar a tolerância das plantas ao estresse hídrico (DIAS & SANTOS, 2022). Ao se instalarem no sistema radicular de plantas sob estresse, liberam substâncias que auxiliam na retenção de água pelas raízes. Uma possível explicação para isso é a ação de bactérias que possuem a enzima ACC desaminase, a qual reduz os níveis elevados de etileno causados pelo estresse (MASCARANHAS, 2021). Conforme mencionado por Kavamura (2012), as BPCPs adotam estratégias como a síntese de exopolissacarídeos e a formação de biofilmes para se resguardarem de estresses abióticos, incluindo a deficiência hídrica. Outras estratégias, como a síntese de AIA e óxido nítrico, conforme apontado por Dimkpa *et al.* (2009), podem influenciar a resistência à falta de água.

Dessa maneira, foram identificadas bactérias do gênero *Bacillus aryabhatai*, capazes de colonizar o sistema radicular das plantas e contribuir para a indução da tolerância à seca. (SHIVAJI *et al.*, 2009; MARIANO, 2022). Pesquisas, como a realizada por Tripathi *et al.* (2019), evidenciaram a capacidade desta bactéria de suportar condições adversas, como temperaturas elevadas e altos níveis de salinidade, o que a torna uma alternativa promissora para aplicação em diversas culturas. O *Bacillus aryabhatai* destaca-se como uma rizobactéria promotora de crescimento vegetal (BPCP) por atuar por múltiplos mecanismos, incluindo a produção de substâncias como ácido indolacético (AIA) e sideróforos, que favorecem a absorção de nutrientes pelas plantas (VERMA *et al.*, 2015). Além de estimular o desenvolvimento vegetal, a bactéria contribui para o aumento da tolerância a condições adversas e para a redução do uso de insumos químicos, configurando-se como uma alternativa promissora para práticas agrícolas mais sustentáveis (SOUZA, 2024).

Este estudo tem como objetivo avaliar o uso de *Bacillus aryabhatai* no cafeeiro como estratégia para mitigar os efeitos do déficit hídrico. Apesar do potencial já demonstrado por essa rizobactéria em outras culturas, não há registros de sua aplicação na cafeicultura, o que confere caráter inédito à pesquisa. A proposta é analisar seus efeitos em parâmetros morfológicos, fisiológicos e bioquímicos das plantas de café, contribuindo para a tolerância ao estresse hídrico. Além disso, o trabalho se apresenta como uma alternativa sustentável para regiões com escassez de água, promovendo a adaptação das plantas a condições ambientais adversas.

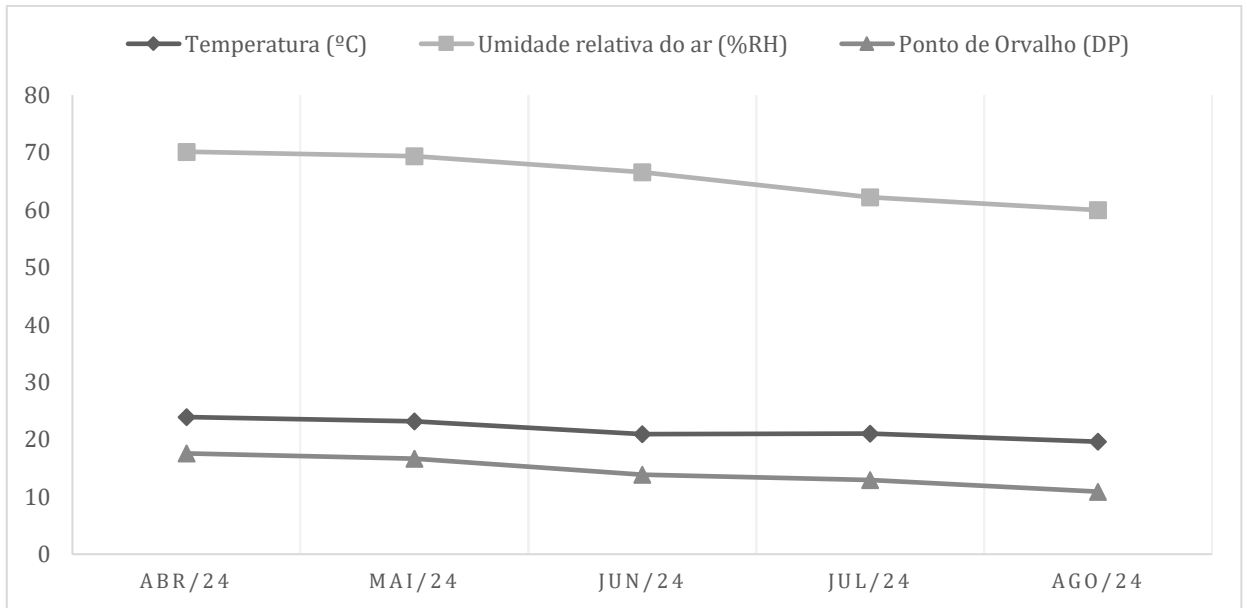
2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área experimental

O estudo foi realizado em casa de vegetação, situada no Setor de Cafeicultura da Universidade Federal de Lavras (UFLA), na cidade de Lavras – MG, na Região Sul de Minas, no período de abril 2024 a agosto de 2024, possuindo altitude média de 910 metros, latitude de 21° 14' 16'' e longitude de 45° 00' 00'' W. Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Cwa, caracterizado como mesotérmico, com verões quentes e úmidos e estiagem durante o inverno. (SÁ JÚNIOR *et al.*, 2012).

Os dados climáticos foram monitorados, por meio de um Datalogger modelo AK174, instalada dentro da casa de vegetação, obtendo dados como, temperatura (°C), umidade relativa do ar (%RH) e ponto de orvalho (DP) (FIGURA 1).

Figura 1- Médias mensais de temperatura (°C), umidade relativa do ar (%RH) e ponto de orvalho (°C), registradas entre abril e agosto de 2024, na área experimental. Os dados correspondem à média dos registros diários obtidos ao longo de cada mês.



Fonte: Da autora (2024)

O solo utilizado foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo eutrófico (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2018) de textura argilosa. As características químicas (camada do solo de 0-20) do solo utilizado estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1- Análise química do solo utilizado, na camada de 0-20 cm, antes da instalação do experimento. Lavras - MG, 2023.

Prof.(cm)	pH (H ₂ O)	P (mg dm ⁻³)	K (mg dm ⁻³)	Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	Mg ²⁺ (mg L ⁻¹)	Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	(H+Al)	SB	(t)	(T)
0-20	6.46	0.49	14.54	0.50	0.11	0.08	1.56	0.64	0.72	2.2
	V (%)	m	M.O. (dag kg ⁻¹)	P-Rem	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S
0-20	24.41	10.95	0.44	7.25	0.14	39.78	7.21	0.53	0.11	11.93

Fonte: Da autora (2023).

*Laudo emitido pelo Laboratório de Análise Agropecuárias de Lavras-MG

Nota: SB = soma de bases trocáveis; (t) = capacidade de troca catiônica efetiva; (T) = capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V = índice de saturação de bases; m = índice de saturação por alumínio.

2.2 Instalação e condução do experimento

O plantio do café foi realizado em 13 de abril de 2024, com mudas de café da

cultivar “Catuaí Amarelo – 62”, que foram plantadas, quando apresentavam quatro pares de folhas verdadeiras, em vasos com volume de 11 litros, dispostos sobre bancadas a 0,8 m do solo.

Para a correção do solo, a dose de calcário utilizada, para elevar a saturação por bases para 60%, correspondeu a 676 kg ha⁻¹. Foi utilizado o calcário dolomítico com 35% de CaO e 18% de MgO, com PRNT de 95%. O calcário foi incorporado de forma uniforme ao solo, que foram incubados em vasos por um período de 45 dias mantendo-se a umidade em torno de 70% do volume total de poros (VTP) ocupados por água. O solo recebeu adubação de plantio conforme recomendações para a cultura do café. A correção do solo e a adubação foram realizadas, de acordo com os resultados da análise de solo (TABELA 1), seguindo as recomendações estabelecidas na 5^a Aproximação da Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais (GUIMARÃES *et al.*, 1999).

O monitoramento de pragas e doenças foi feito regularmente, e a aplicação foliar de micronutrientes seguiu as especificações para o cultivo de café, garantindo a suplementação adequada de elementos essenciais.

Após o plantio das mudas nos vasos, o substrato foi mantido com uma umidade equivalente a 100% da água disponível no solo por um período de 30 dias. Isso foi feito para assegurar o estabelecimento adequado das mudas e para promover a uniformização do crescimento das plantas. Posteriormente, foi iniciada a diferenciação da irrigação e dose de *Bacillus aryabhatai*, de acordo com cada tratamento.

A reposição da água para irrigação foi realizada com base na diferença de peso, utilizando um método gravimétrico com balanças eletrônicas. Inicialmente, registrou-se o peso dos vasos nas condições de 100% de água disponível. Em seguida, foram determinados os pesos dos vasos, contendo, planta, solo e água para cada unidade experimental proposto, correspondendo a 0%, 25%, 50% e 75% de déficit hídrico.

O acompanhamento da demanda de irrigação foi efetuado em intervalos de três vezes por semana (nas segundas, quartas e sextas-feiras). Com base na discrepância entre o peso atual das plantas e o peso inicialmente estabelecido, procedeu-se à reposição da massa de água perdida por evapotranspiração em cada vaso. Dessa maneira, buscou-se restabelecer o peso correspondente ao tratamento determinado.

As mudas de café foram inoculadas em julho de 2024 com um produto comercial contendo *Bacillus aryabhatai*. A aplicação foi realizada diretamente no solo, próximo ao sistema radicular, utilizando uma seringa de 60 mL para maior precisão na dosagem.

Para cada tratamento experimental, preparou-se uma solução específica, diluindo-se a quantidade correspondente de inoculante em 1 litro de água.

2.3 Delineamento experimental e tratamentos

Os fatores em estudo foram dispostos em delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 5x4 com quatro repetições, totalizando 20 tratamentos e 80 unidades experimentais. Cada parcela experimental foi constituída por uma planta. Os tratamentos constituíram da combinação entre os níveis dos dois fatores em estudo sendo um deles as doses de inoculante a base de *Bacillus aryabhatai* (0, 1, 2, 3 e 4 ml L⁻¹) e o outro fator composto por quatro níveis de déficit hídrico (0, 25, 50 e 75%) conforme detalhado na Tabela 2.

Tabela 2- Distribuição de tratamentos com doses variáveis de inoculação de *Bacillus aryabhatai* em diferentes níveis de déficit hídrico.

Tratamentos	Doses de <i>Bacillus aryabhatai</i> (ml Litro ⁻¹)	Níveis de déficit hídrico (%)
1	0	0
2	0	25
3	0	50
4	0	75
5	1	0
6	1	25
7	1	50
8	1	75
9	2	0
10	2	25
11	2	50
12	2	75
13	3	0
14	3	25
15	3	50
16	3	75
17	4	0
18	4	25
19	4	50
20	4	75

Fonte: Do Autor (2023)

2.4 Características avaliadas

As medições das características avaliadas foram realizadas em quatro momentos distintos ao longo do crescimento das mudas de café. A primeira avaliação ocorreu 30 dias após o início da irrigação frequente, mantida em 100% da capacidade de campo, período em que as plantas receberam irrigação regular. Após esses 30 dias iniciais, foi realizada a inoculação das mudas, aplicando-se as dosagens correspondentes a cada tratamento experimental. Em seguida, teve início a fase de diferenciação hídrica, com a aplicação dos diferentes níveis de irrigação conforme os tratamentos estabelecidos. Trinta dias após o início dessa fase, foi realizada a segunda avaliação. A terceira avaliação ocorreu 20 dias depois, momento em que se fez necessário restabelecer a irrigação para proteger as mudas, buscando reverter possíveis danos causados pelo estresse hídrico prolongado e restabelecer condições adequadas para seu desenvolvimento. Por fim, a quarta avaliação foi realizada 30 dias após o restabelecimento da irrigação, coincidindo com o início de uma nova fase de diferenciação hídrica. Nessa etapa, as mudas estavam novamente submetidas ao estresse hídrico, permitindo a análise dos efeitos prolongados do déficit hídrico no desenvolvimento das plantas.

2.4.1 Características morfológicas

As avaliações do crescimento vegetativo das plantas, foram realizadas nas quatro épocas estudadas.

Foram analisadas as características de crescimento:

Altura de plantas (AP): em cm, medida do colo da planta até a gema apical do ramo ortotrópico, por meio de régua graduada;

Diâmetro de caule (DC): em mm, medida na região do colo da planta, por meio de um paquímetro eletrônico;

A determinação da matéria seca das mudas foi realizada exclusivamente na quarta avaliação, conduzida em agosto de 2024, em razão do caráter destrutivo dessa análise.

Matéria Seca (MS): As plantas de café foram cuidadosamente retiradas do solo

dos vasos em que estavam cultivadas. Em seguida, as raízes foram lavadas com água para remover completamente os resíduos aderidos. Após a limpeza, as plantas passaram por um processo de secagem inicial em bancadas expostas ao sol. Posteriormente, as amostras foram separadas em parte aérea (MSPA) e sistema radicular (MSR), sendo acondicionadas em sacos de papel devidamente identificados com os números dos tratamentos. A matéria seca total (MST) foi obtida pela soma das massas secas da parte aérea e do sistema radicular, após secagem.

No dia seguinte, as partes separadas foram pesadas utilizando uma mini balança digital de precisão, e os valores obtidos foram devidamente registrados. No mesmo dia, para a determinação da biomassa seca, ambas as partes das plantas foram submetidas à secagem em estufa de circulação forçada de ar, a 70 °C, onde permaneceram por um período de sete dias, até atingirem massa constante. Após esse período foram retiradas da estufa para que pudessem ser pesadas novamente.

2.4.2 Características fisiológicas

2.4.2.1 Potencial Hídrico

Nas quatro épocas de avaliação, também, foram determinadas as características fisiológicas das plantas.

Foi avaliada a condutância estomática (CONDU) com o auxílio do porômetro (SC-1, Decagon Devices). As leituras foram feitas em dias típicos, claros, estabelecida pelo terceiro par de folhas, completamente expandidas, no período compreendido entre às 9 hs e 11 hs da manhã.

Determinou-se os índices de clorofila a (CIA), b (CIB) e total (CIT), obtidos por meio do aparelho digital ClorofiLOG (modelo CFL 1030). O aparelho fornece os índices proporcionais à absorvância das clorofilas. As leituras foram realizadas nas mesmas folhas utilizadas para as avaliações de condutância estomática.

O potencial hídrico foliar (PH - MPa) foi determinado, no período “antemanhã”, utilizando câmara de pressão (modelo 1000, PMS Instrument Company). As folhas coletadas, completamente expandidas e isentas de pragas e doenças, foram avaliadas na câmara, aplicando-se pressão até que ocorresse a exsudação da seiva do xilema pelo corte feito no pecíolo da folha.

2.4.3 Características Bioquímicas

As amostras de folhas utilizadas nas análises bioquímicas foram coletadas durante o período de estresse hídrico das mudas, correspondente à quarta avaliação, realizada em agosto/2024. Foram consideradas as atividades enzimáticas da dismutase do superóxido (SOD), catalase (CAT) e peroxidase do ascorbato (APX) e o estresse oxidativo por meio da quantificação do peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e peroxidação lipídica (PL) e a quantificação do ascorbato. As folhas destinadas aos ensaios bioquímicos foram recolhidas no período vespertino, entre 12h e 13h, e imediatamente imersas em nitrogênio líquido. Posteriormente, foram armazenadas em um ultrafreezer a -80 °C, onde permaneceram até o momento da maceração e preparação dos extratos.

2.4.3.1 Metabolismo antioxidante

Para a determinação da atividade das enzimas do sistema antioxidante, utilizou-se como referência o protocolo de extração de Biemelt, Keltman e Albert (1980). As folhas foram maceradas em nitrogênio líquido e pesados 100 mg da amostra em microtubos e adicionado o tampão de extração composto de: EDTA 0,01M; fosfato de potássio 0,4M (pH 7,8); ácido ascórbico 0,2M e água destilada. O homogeneizado foi centrifugado a 13.000 g por 10 minutos a 4°C e o sobrenadante coletado e armazenado a -80°C, para posteriores análises das enzimas, dismutase do superóxido (SOD), peroxidase do ascorbato (APX) e catalase (CAT).

A atividade da SOD foi avaliada pela capacidade da enzima em inibir a fotorredução do azul de nitrotetrazólio (NBT) proposta por Giannopolis e Ries (1977). Para isso, foram adicionadas alíquotas de 10 µL ao meio de incubação composto por fosfato de potássio 50mM, pH 7.8, metionina 14mM, EDTA 0.1 µM, NBT 75µM e riboflavina 2µM e água destilada. Posteriormente, as microplacas foram iluminadas com lâmpada fluorescente de 20 W por sete minutos e realizaram-se as leituras a 560nm. Uma unidade da SOD corresponde à quantidade de enzima necessária para inibir em 50% a fotorredução do NBT nas condições do ensaio.

Para a determinação da CAT foi utilizado o protocolo de Mengutay *et al.* (2013). Para isso, foram adicionadas alíquotas de 2 µL do sobrenadante adicionadas ao meio de incubação, contendo tampão fosfato 45mM e pH 7.6, Na₂EDTA 0.1 mM dissolvido no tampão e peróxido de hidrogênio 10mM. A determinação dessa enzima foi obtida pelo decréscimo na absorvância a 240nm, a cada 15 segundos, por 3 minutos, monitorado

pelo consumo de peróxido de hidrogênio. O coeficiente de extinção molar utilizado foi $36 \text{ mM}^{-1}\text{cm}^{-1}$.

A atividade da APX foi determinada pelo acompanhamento da taxa de oxidação do ascorbato a 290 nm, a cada 15 segundos, por três minutos (NAKANO; ASADA, 1981). Para isso, foram adicionadas alíquotas de 3 μL do sobrenadante ao meio de incubação contendo tampão fosfato de potássio 50 mM com pH 6.0, ácido ascórbico 0.8 mM e peróxido de hidrogênio 1 mM. O coeficiente de extinção molar foi $2.8 \text{ mM}^{-1}\text{cm}^{-1}$.

Nestas análises foram utilizadas microplacas de microtitulação de 96 poços e as leituras realizadas em leitora de microplacas Multiskan Go (Thermo Scientific).

2.4.3.2 Quantificação de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e peroxidação lipídica (PL)

Para as análises do estresse oxidativo (H_2O_2 e PL) foram macerados 100 mg do material foliar em nitrogênio líquido, homogeneizados em 1500 μL de ácido tricloroacético (TCA) 0,1% (m/v) e centrifugados a 12000 g por 15 minutos a 4°C. O sobrenadante foi coletado e armazenado a -80°C, para posteriores análises.

Para a quantificação do H_2O_2 , alíquotas do sobrenadante foram adicionadas ao meio de reação composto por tampão fosfato de potássio 10 mM pH 7.0 e iodeto de potássio 1 M, em microplacas de microtitulação de 96 poços. Foram determinados a concentração de H_2O_2 pela absorbância das amostras a 390 nm com base na curva-padrão de concentrações de H_2O_2 conhecidas (VELIKOVA; YORDANOV; EDREVA, 2000),

Na quantificação da PL, alíquotas de 2 μL foram adicionadas em microtubos ao meio de reação contendo 0.5% (m/v) de ácido tiobarbitúrico (TBA) e 10% (m/v) de TCA. Em seguida, o meio foi incubado a 95°C, por 30 minutos, paralisando a reação por resfriamento rápido em gelo e realizada as leituras a 535nm e 600nm em microplacas de microtitulação de 96 poços. A peroxidação foi expressa em ηmol de malondialdeído ($\text{MDA.g}^{-1}\text{MF}$).

2.4.3.3 Quantificação do Ascorbato

A quantificação de ascorbato foi determinada de acordo com Arakawa *et al.* (1981). Foram macerados 50 mg de matéria fresca, Esse macerado foi homogeneizado com ácido tricloroacético (TCA 5%) (m/v) e centrifugado a 10.000 g, por 15min, a 4°C. Foi adicionada uma alíquota do sobrenadante ao meio de reação composto por: TCA

5% (m/v), etanol 99.8% (v/v), ácido ascórbico, ácido fosfórico (H_3PO_4) 0.4% em etanol (v/v), batofenantrolina 0.5% em etanol (p/v) e cloreto de ferro (III) ($FeCl_3$) em etanol (m/v). Em seguida, este meio foi homogeneizado e incubado a 30°C, por 90 minutos. A determinação da concentração de ascorbato foi com a absorbância das amostras a 534 nm e com base na curva-padrão com concentrações conhecidas.

2.4.4 Características anatômicas

As avaliações anatômicas foram realizadas na quarta avaliação, e foram processadas no Laboratório de Anatomia e Fisiologia do Cafeeiro, em folhas frescas coletadas na casa de vegetação em setembro de 2024, correspondentes ao terceiro par de folhas completamente desenvolvidas. As secções paradérmicas foram obtidas a partir da técnica de impressão da epiderme (SEGATO *et al.*, 2004), colocando-se uma gota de adesivo instantâneo universal (éster de cianoacrilato) sobre uma lâmina de vidro e a parte central da folha, permitindo a separação da epiderme da mesma. Foram mensurados o número de estômatos (ne), que serviu de base para o cálculo da densidade estomática ($den = ne/mm^2$), além do diâmetro polar (dp - μm) e do diâmetro equatorial (de - μm) dos estômatos, os quais foram utilizados para determinar a relação dp/de.

Para os estudos anatômicos das secções transversais, as folhas foram fixadas em etanol 70% (v/v) (JOHANSEN, 1940) por cerca de 72 horas, sendo posteriormente substituídas pelo mesmo reagente para a conservação das amostras. O material vegetal foi submetido a concentrações progressivas de etanol (70%, 80%, 90% e 100%), com intervalos de 2 horas entre cada troca. As amostras foram incluídas em historesina conforme as orientações do fabricante (Leica Microsystems, Wetzlar, Alemanha), e secções de 8 μm de espessura foram obtidas com o uso de um micrótomo rotativo semiautomático modelo MRP 2015 da Lupetec Tecnologia Aplicada (Lupe Indústria Tecnológica de Equipamentos para Laboratório, Brasil). As secções foram coradas com azul de toluidina a 1% (m/v) e montadas com verniz vitral (PAIVA *et al.*, 2006). As características avaliadas incluíram a área total dos vasos (ATV), área total do xilema e medula (ATXM), área dos vasos do metaxilema (AMET), área do floema (AF), área do xilema (AX), frequência de vasos do xilema (FVX), área da medula (AM), raio dos vasos (RV), diâmetro de vasos (DV), índice de vulnerabilidade do xilema (IVX), condutividade hidráulica do xilema (CHX) e número de vasos do xilema (NVX).

As lâminas de ambas secções foram analisadas em microscópio óptico, modelo

Red 200, da marca Kasvi/Motic, equipado com uma câmera digital modelo D-Moticam 5MP da Motic. As imagens obtidas foram analisadas utilizando o software UTHSCSA-Imagetool.

2.5 Análise estatística

Para as variáveis resposta de contagem, foram ajustados modelos lineares generalizados mistos (GLMM) com distribuição de Poisson, considerando os efeitos de bloco e de parcela como aleatórios, utilizando a função `glmer()` do pacote `lme4`. Para as variáveis resposta contínuas, foram ajustados modelos lineares mistos (LMM), considerando os efeitos de bloco e de parcela como aleatórios, com a função `lmer()` do pacote `lme4`.

Para verificar as hipóteses de interesse para os efeitos principais (concentração de *B. aryabhatai* e níveis de deficit hídrico) e da interação, foi realizada a análise de deviance, sendo as hipóteses testadas por meio do teste de qui-quadrado de Wald tipo II com a função `anova()` do pacote `car`, utilizando um nível de significância de 5%.

Com evidências de efeitos significativos (valor $p < 0,05$) para os fatores ou para a interação, foram ajustados modelos lineares mistos de regressão polinomiais, por meio da função `lmer()`. Para a interação, foi realizado o desdobramento das concentrações de *B. aryabhatai* dentro dos níveis de deficit hídrico.

Os modelos de regressão polinomiais foram comparados utilizando o teste da razão de verossimilhança. A escolha do melhor grau do polinômio foi baseada nos Critérios de Informação de Akaike (AIC) e Bayesiano (BIC) e significância do teste. Modelos com valores menores de AIC e BIC indicam um melhor ajuste aos dados com menos complexidade.

Após a escolha do polinômio, procedeu-se ao teste de falta de ajuste (desvio de regressão), que verifica se o modelo escolhido é adequado para representar os dados observados. A comparação foi feita por meio do teste da razão de verossimilhança entre o modelo escolhido e um modelo mais complexo (modelo de interação ou modelo de efeito principal) para avaliar se há falta de ajuste significativa. Os testes da razão de verossimilhança foram realizados usando a função `anova()` com um nível de significância de 5%.

Para os casos em que não foi obtido um modelo de regressão polinomial com um bom ajuste, foi utilizada a regressão polinomial local com suavização (LOESS). A

técnica LOESS ajusta polinômios locais aos dados, proporcionando uma linha suavizada que segue a tendência geral dos dados. Esse método é particularmente útil para capturar padrões não lineares complexos nos dados, sem assumir uma forma funcional específica. A função `geom_smooth()` do pacote `ggplot2` foi utilizada para ajustar a regressão LOESS aos dados, e a suavização foi controlada pelo parâmetro `span` (0,75), que determina o tamanho da vizinhança local ao redor de cada ponto de dados.

Adicionalmente, foram obtidas as estimativas das médias marginais e dos erros-padrões das estimativas, por meio da função `emmeans()` do pacote `emmeans` (Lenth, 2021). Com essas estimativas, foram realizadas múltiplas comparações, com nível de significância de 5%, utilizando o método de Sidak para o ajuste do nível de confiança (valor p), e, por meio da função `cld()` do pacote `multcomp` (Hothorn *et al.*, 2008), foram geradas as letras das comparações. O teste de Sidak foi escolhido em detrimento ao Tukey, pois é mais adequado para comparação de médias oriundas de amostras de diferentes tamanhos, considerando que houve unidades amostrais perdidas durante a condução do experimento.

A função `ggplot()` do pacote `ggplot2` foi utilizada para gerar as representações gráficas dos modelos ajustados, que foram plotadas juntamente com as estimativas das médias marginais, seus respectivos erros-padrão e as letras das comparações múltiplas.

Todos os procedimentos foram realizados no software R versão 4.4.2.

4.0 RESULTADOS

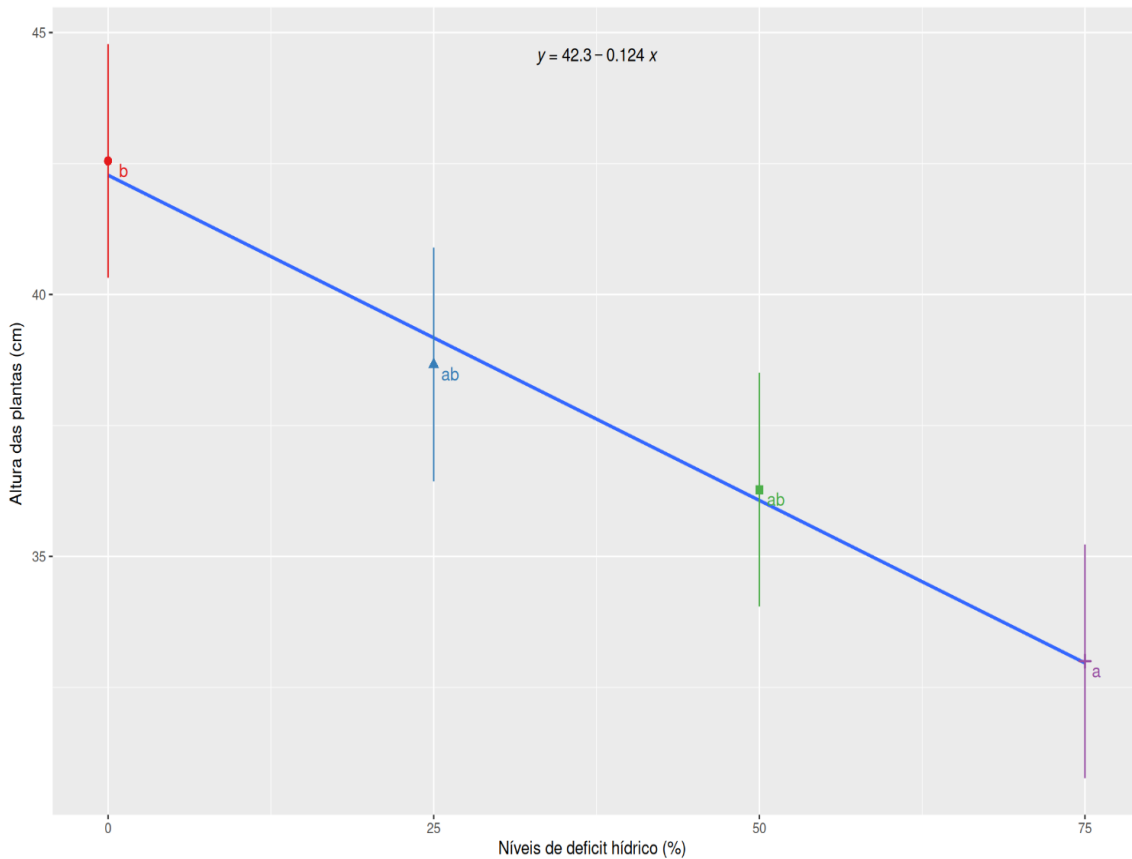
4.1 Características morfológicas

4.1.1 Altura de plantas

Observou-se que a altura de plantas de cafeeiro apresentou um comportamento linear decrescente em que o aumento do déficit hídrico foi associado à redução da altura.

Verificou-se que altura das plantas foi maior no tratamento sem déficit hídrico (0%) e menor no tratamento com o maior déficit hídrico (75%) (Figura 2).

Figura 2- Gráfico de regressão de ajuste da altura das plantas em função dos níveis do déficit hídrico.

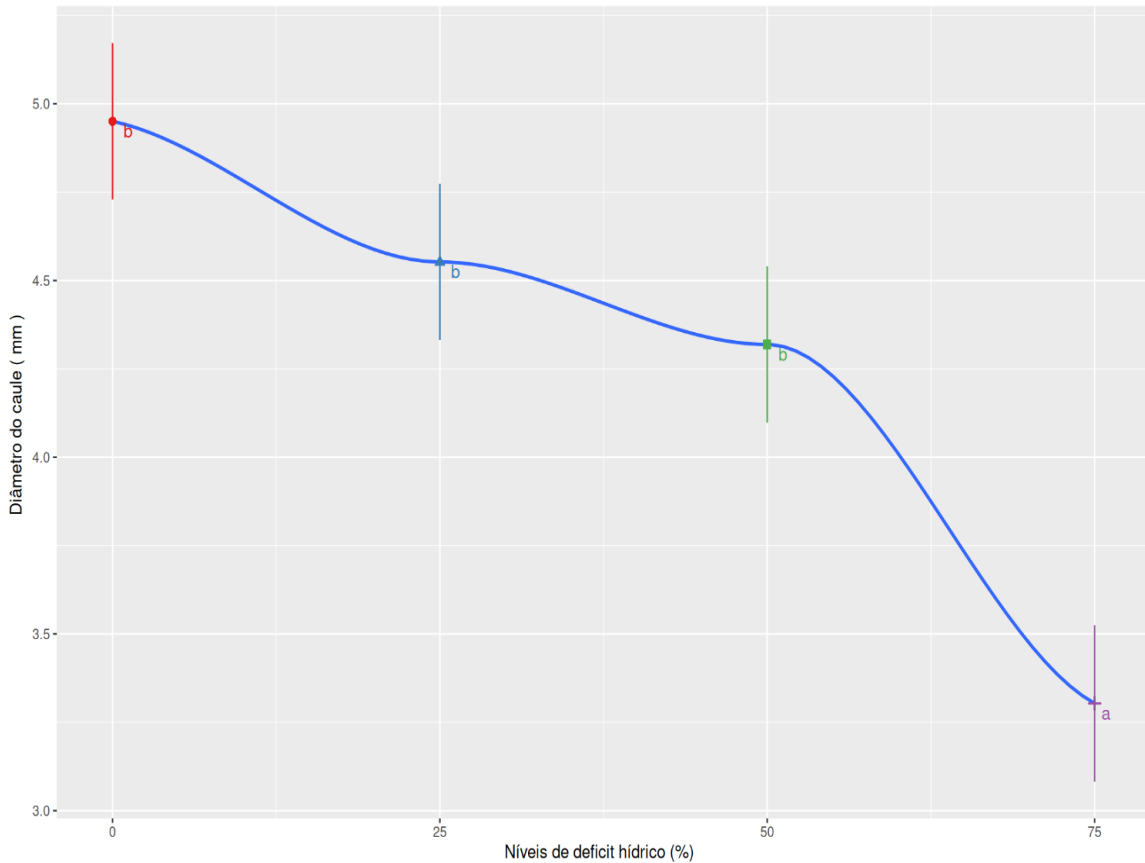


Fonte: Da autora (2025)

4.1.2 Diâmetro de caule

Em relação ao diâmetro de caule do cafeeiro verificou-se que não houve diferença nos níveis de déficit hídrico 0%, 25% e 50%. Entretanto, com 75% de déficit, observou-se uma redução expressiva, distinta dos demais tratamentos (Figura 3).

Figura 3 - Gráfico de regressão de ajuste do diâmetro do caule em função dos níveis do déficit hídrico.



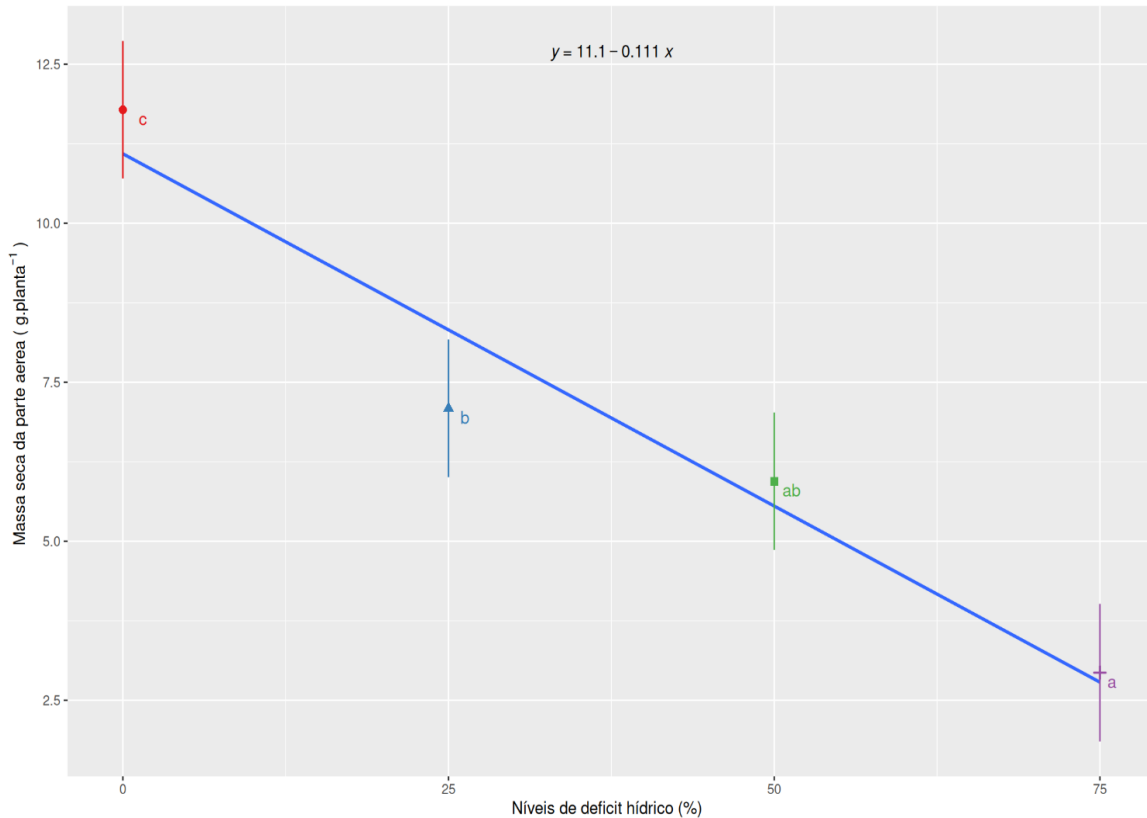
Fonte: Da autora (2025)

4.1.2 Massa Seca

4.1.3.1 Massa seca da parte aérea (MSPA)

Constatou-se que a massa seca da parte aérea das plantas (MSPA) foi maior sem déficit hídrico (~11,8 g/planta). Com 25% de déficit, houve uma redução para 7,1 g/planta. No nível de 50%, caiu para 5,9 g/planta e, em 75% de déficit, houve uma redução drástica para 2,9 g/planta, evidenciando um estresse severo que impactou significativamente a biomassa das plantas (Figura 4).

Figura 4- Gráfico de regressão de ajuste da massa seca da parte aérea em função dos níveis do déficit hídrico.

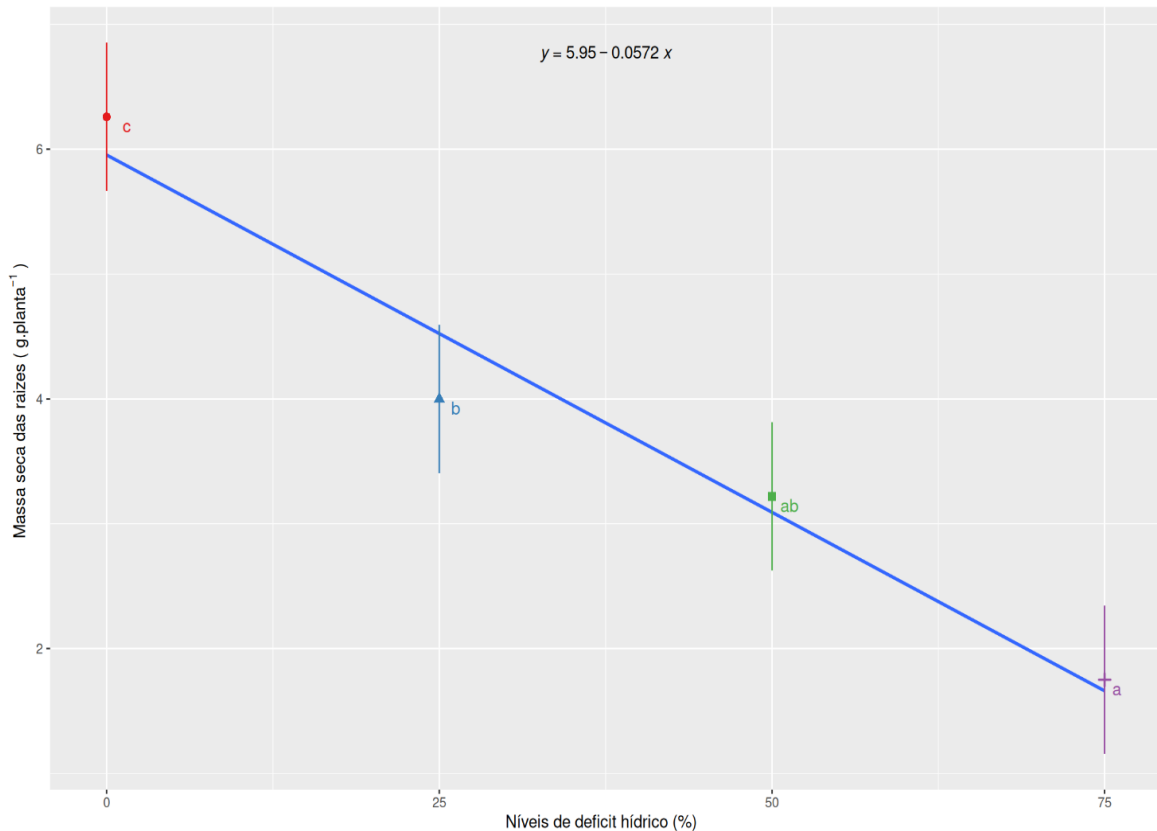


Fonte: Da autora (2025)

4.1.4 Massa seca das raízes (MSR)

Observou-se que a maior massa seca das raízes ocorreu no tratamento sem déficit hídrico (0%), com uma média de aproximadamente 6 g/planta. Com 25% de déficit hídrico, houve uma redução para cerca de 4 g/planta. No nível de 50% de déficit hídrico, a massa seca das raízes continuou diminuindo, com média próxima de 3 g/planta. No maior déficit hídrico (75%), registrou-se a menor massa seca das raízes, em torno de 2 g/planta (Figura 5).

Figura 5 - Gráfico de regressão de ajuste da massa seca das raízes em função dos níveis do déficit hídrico.



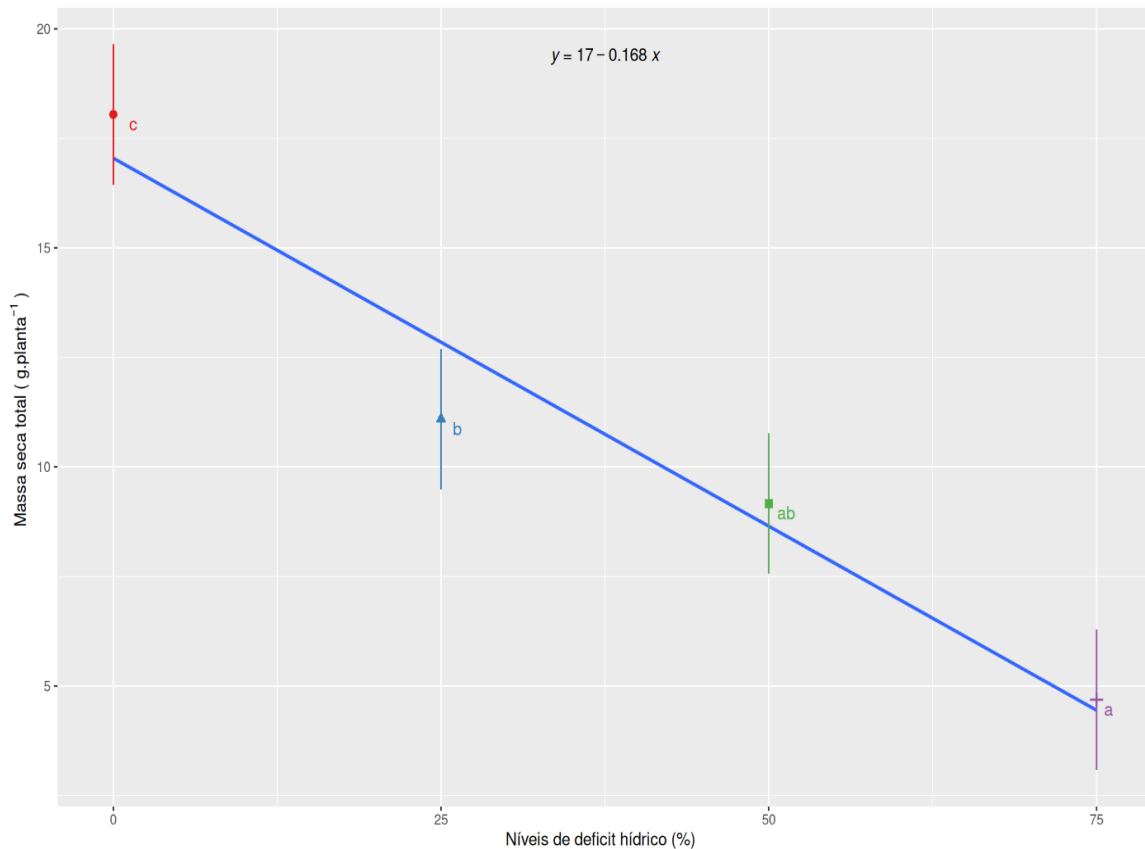
Fonte: Da autora (2025)

4.1.5 Massa seca total (MST)

Verificou-se que, para massa seca total das plantas, a cada aumento de 1% no déficit hídrico houve uma redução média de 0,168 g/planta na massa seca total (Figura 6).

No nível de 0%, a massa seca total atingiu seu valor máximo, cerca de 18 g/planta. No nível de 25% de déficit, houve uma redução para aproximadamente 11 g/planta. Com 50% de déficit, a massa seca total continuou diminuindo para cerca de 9 g/planta e no nível de 75% de déficit, observou valor mínimo, cerca de 4,5 g/planta (Figura 6).

Figura 6 - Gráfico de regressão de ajuste da massa seca total em função dos níveis do déficit hídrico.



Fonte: Da autora (2025)

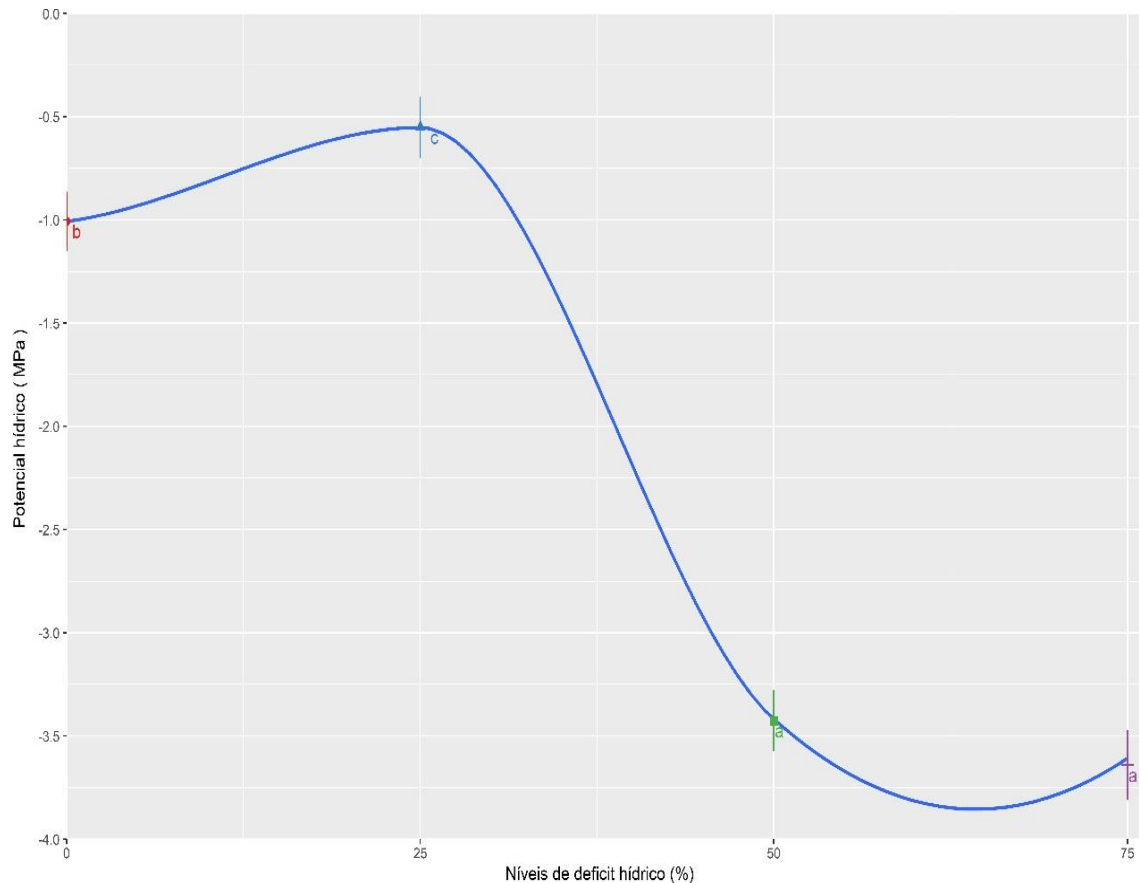
4.2 Características fisiológicas

4.2.1 Potencial Hídrico

Verificou-se no déficit hídrico de 50%, que o potencial hídrico apresentou valores abaixo de -2,5 MPa (Figura 7). Esse nível de estresse hídrico já representou uma condição crítica para a planta.

No nível máximo de déficit hídrico, em torno de 75%, o potencial hídrico apresentou valores próximos de -3,5 MPa, caracterizando um estresse hídrico severo.

Figura 7 - Gráfico de regressão de ajuste do potencial hídrico em função dos níveis do déficit hídrico.



Fonte: Da autora (2025)

4.2.2 Índice de Clorofila

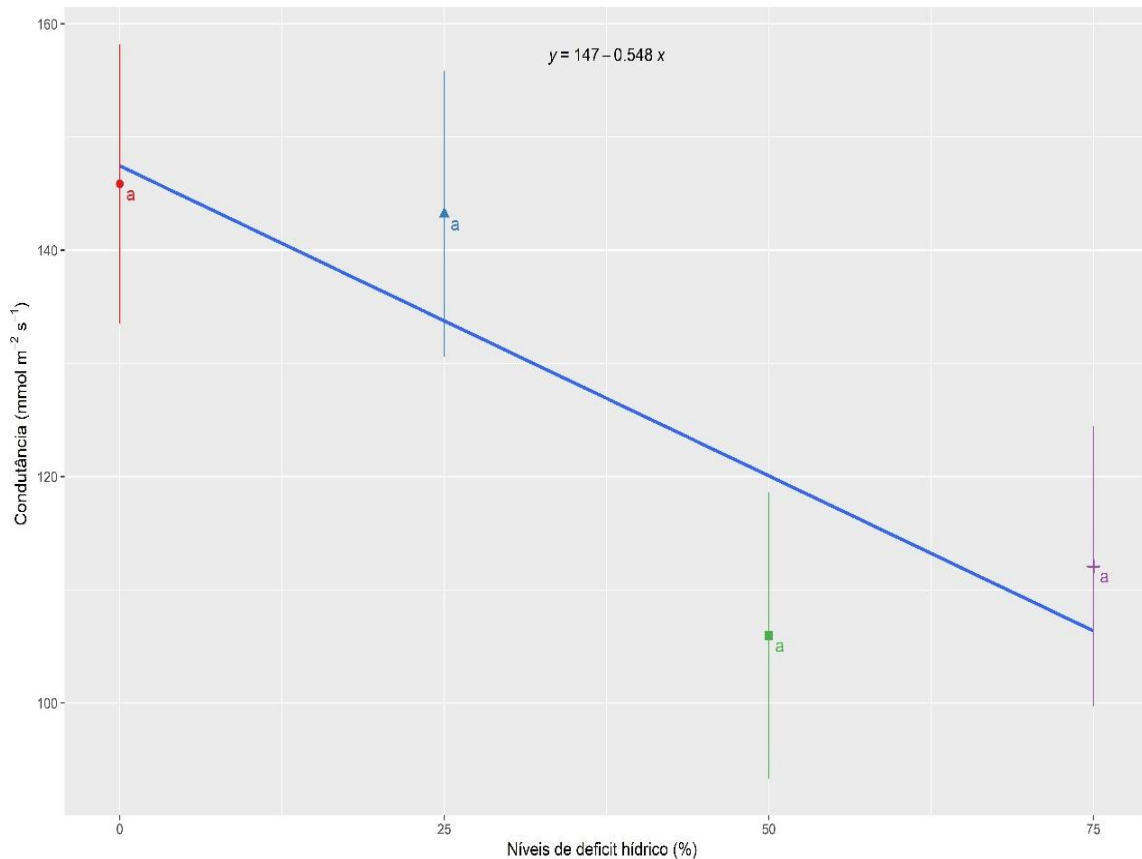
Os resultados obtidos indicaram que os tratamentos não tiveram um efeito significativo sobre os índices de clorofila A, clorofila B e clorofila total.

4.2.3 Condutância estomática (CONDU)

Verificou-se que a condutância estomática diminuiu progressivamente à medida que o déficit hídrico aumentou (Figura 8).

No nível de 0% de déficit hídrico, as plantas não sofreram restrição de água e apresentaram a maior condutância estomática. No nível de 25% de déficit hídrico, ainda se manteve elevada. No nível de 50% de déficit hídrico, observou-se uma queda mais acentuada, enquanto no nível de 75% de déficit hídrico, verificou-se que a condutância estomática atingiu seu menor valor (Figura 8).

Figura 8 - Gráfico de regressão da condutância estomática em função dos níveis de déficit hídrico.



Fonte: Da autora (2025)

4.3 Características bioquímicas

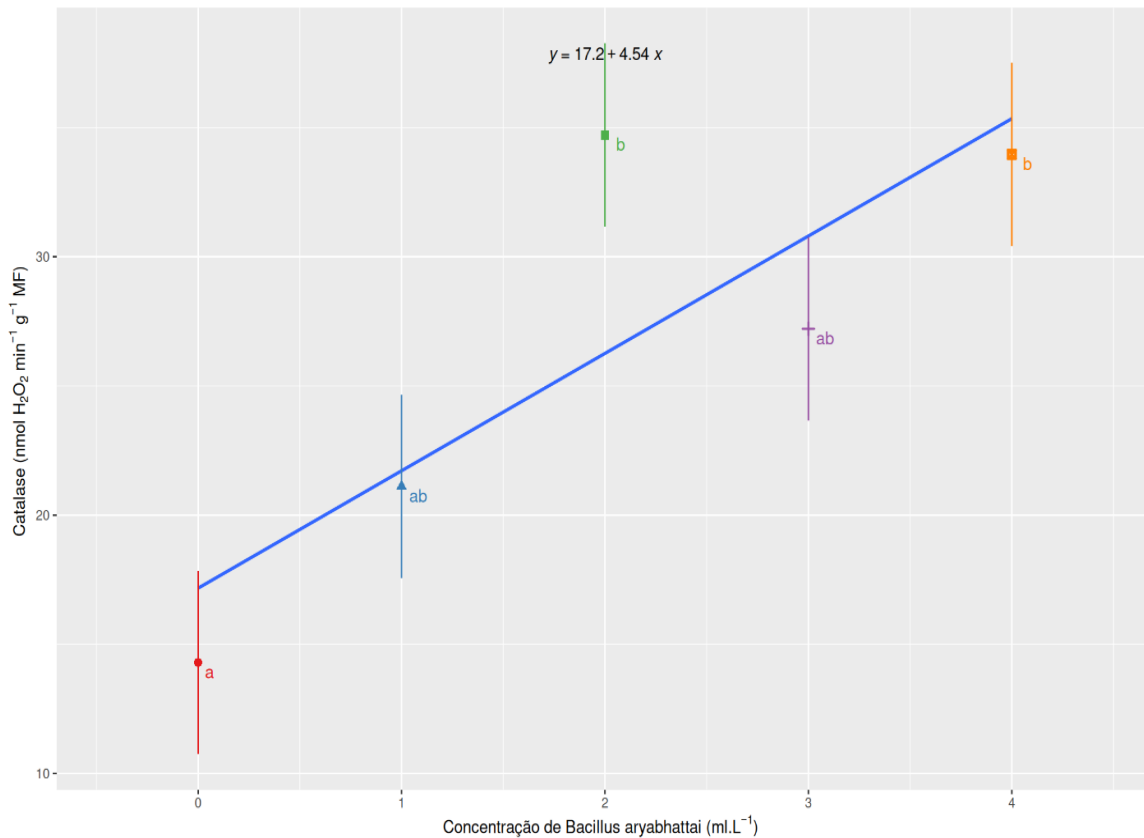
4.3.1 Metabolismo antioxidante

4.3.1.1 Catalase (CAT)

Para a catalase, observou-se um aumento linear da atividade da enzima à medida que a concentração do *Bacillus aryabhattai* aumentou (Figura 9).

Na concentração de 0 mL⁻¹ de *Bacillus aryabhattai* verificou-se que a atividade da enzima foi menor que nas concentrações 2 mL⁻¹ e 4 mL⁻¹.

Figura 9 - Gráfico de regressão de ajuste da catalase em função das concentrações de *B. aryabhattai*.

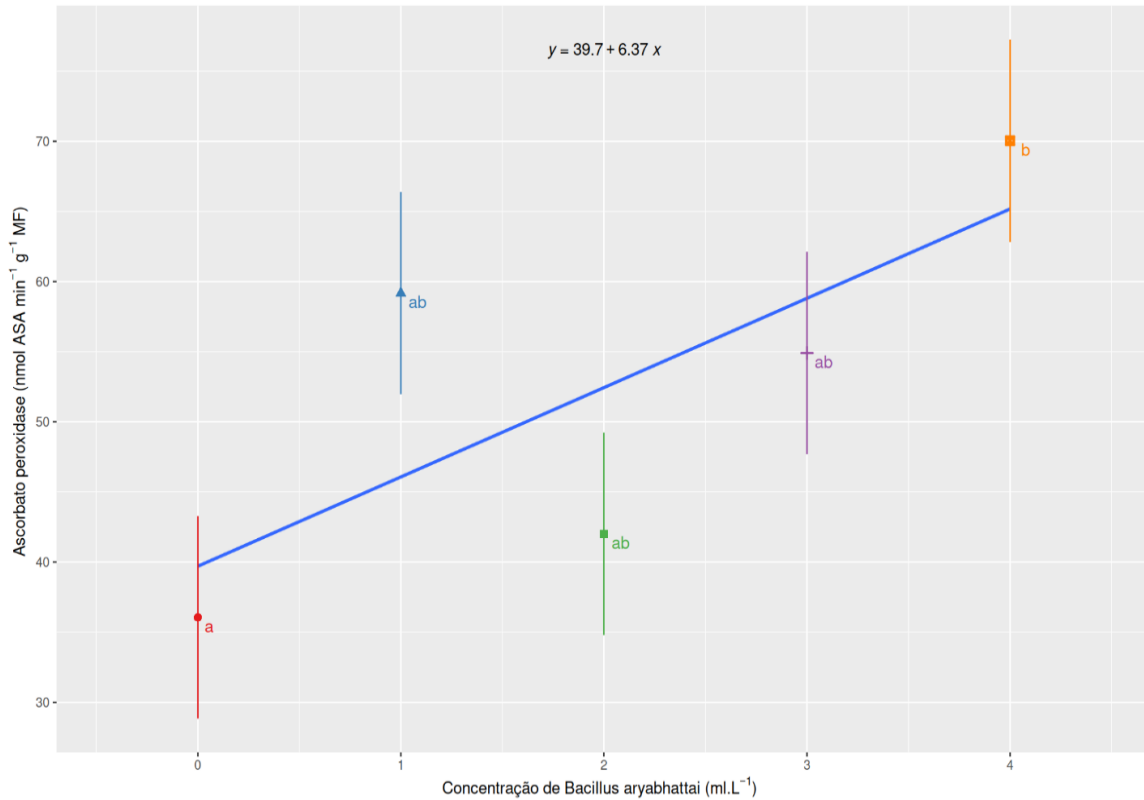


Fonte: Da autora (2025)

4.3.1.2 Ascorbato peroxidase (APX)

Verificou-se que a maior atividade da ascorbato peroxidase (APX) foi observada na concentração mais alta de *Bacillus aryabhatai* (4 mL L⁻¹), enquanto a menor foi no controle (0 mL L⁻¹) (Figura 10).

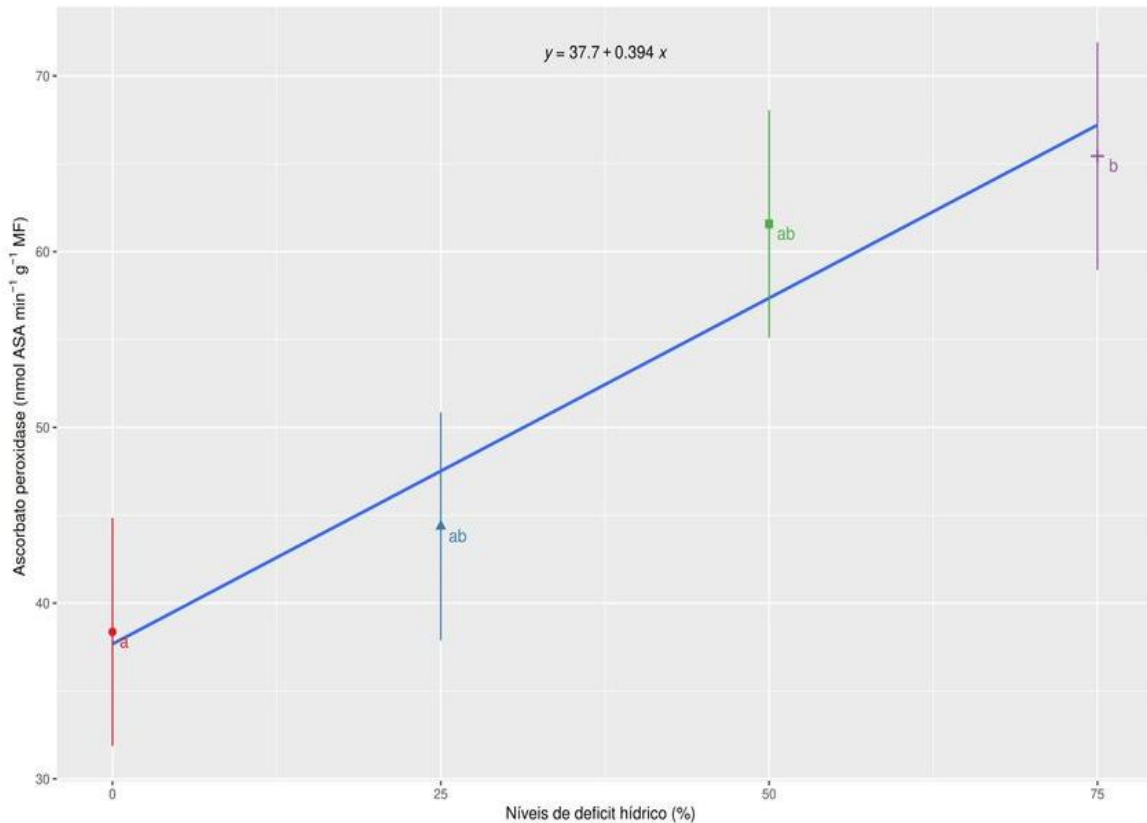
Figura 10- Gráfico de regressão de ajuste da ascorbato peroxidase em função das concentrações de *B. aryabhatai*.



Fonte: Da autora (2025)

Ainda em relação a ascorbato peroxidase, observou-se que, no tratamento sem déficit hídrico (0%), houve menor atividade. O déficit de 25% apresentou atividade intermediária, não diferindo do controle (0%), mas também não diferindo dos tratamentos com maiores déficits. Os tratamentos com déficits de 50% e 75% exibiram as maiores atividades de ascorbato peroxidase (Figura 11).

Figura 11 - Gráfico de regressão de ajuste da ascorbato peroxidase em função dos níveis de déficit hídrico.



Fonte: Da autora (2025)

4.3.1.3 Superóxido dismutase (SOD)

Os resultados obtidos indicaram que não houve efeito significativo de *Bacillus aryabhattai* e de níveis de déficit hídrico na atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) (U SOD min⁻¹ g⁻¹ MF).

4.3.1.4 Quantificação de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e peroxidação lipídica (PL)

4.3.1.4.1 Quantificação de peróxido de hidrogênio (H₂O₂)

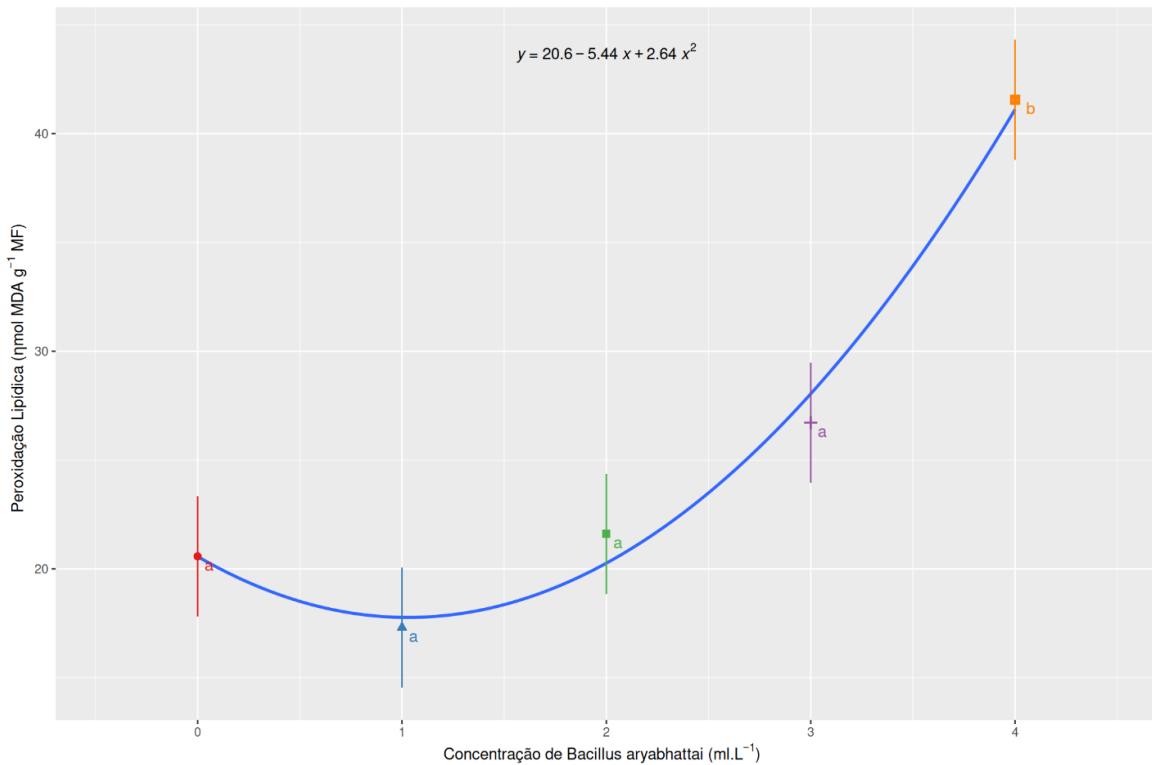
Os resultados obtidos indicaram que não houve efeito significativo de *Bacillus aryabhattai* e de níveis de déficit hídrico na quantificação de peróxido de hidrogênio (nmol H₂O₂ min⁻¹ g⁻¹ MF).

4.3.1.4.2 Peroxidação lipídica (PL)

Verificou-se que a peroxidação lipídica (PL) inicialmente diminuiu com o aumento da concentração de *Bacillus aryabhattai*, mas a partir de certo ponto, aumentou progressivamente (Figura 12).

Quando a concentração de *Bacillus aryabhatai* aumentou de 0 para 1 mL L⁻¹, houve uma ligeira redução na peroxidação lipídica. Com o aumento da concentração para 2, 3 e 4 mL L⁻¹, a peroxidação lipídica apresentou comportamento crescente.

Figura 12 - Ajuste de regressão para peroxidação lipídica em função das concentrações de *Bacillus aryabhatai*.



Fonte: Da autora (2025)

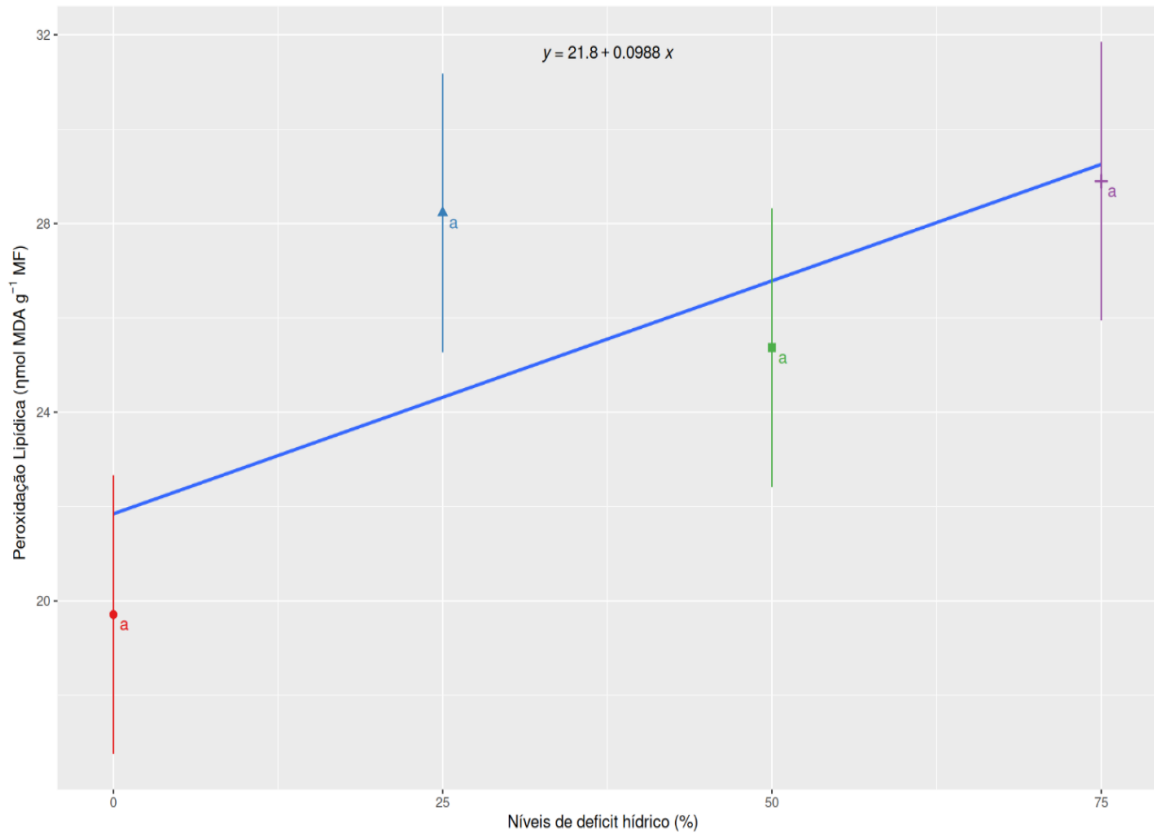
Ao estudar a peroxidação lipídica em função dos níveis de déficit hídrico, observou-se que o nível de 0% apresentou um valor médio de aproximadamente 19,71 nmol MDA g⁻¹ MF, indicando menor estresse oxidativo (Figura 13).

Com o aumento do déficit hídrico para 25%, a peroxidação lipídica subiu, o que demonstrou um leve aumento do estresse oxidativo.

No nível de 50% de déficit hídrico, a peroxidação lipídica apresentou um leve declínio, sugerindo uma possível ativação de mecanismos adaptativos.

No déficit hídrico severo (75%), observou-se que a peroxidação lipídica atingiu um dos valores mais altos, evidenciando um maior impacto do estresse oxidativo.

Figura 13 - Gráfico de regressão de ajuste da peroxidação lipídica em função dos níveis de déficit hídrico.

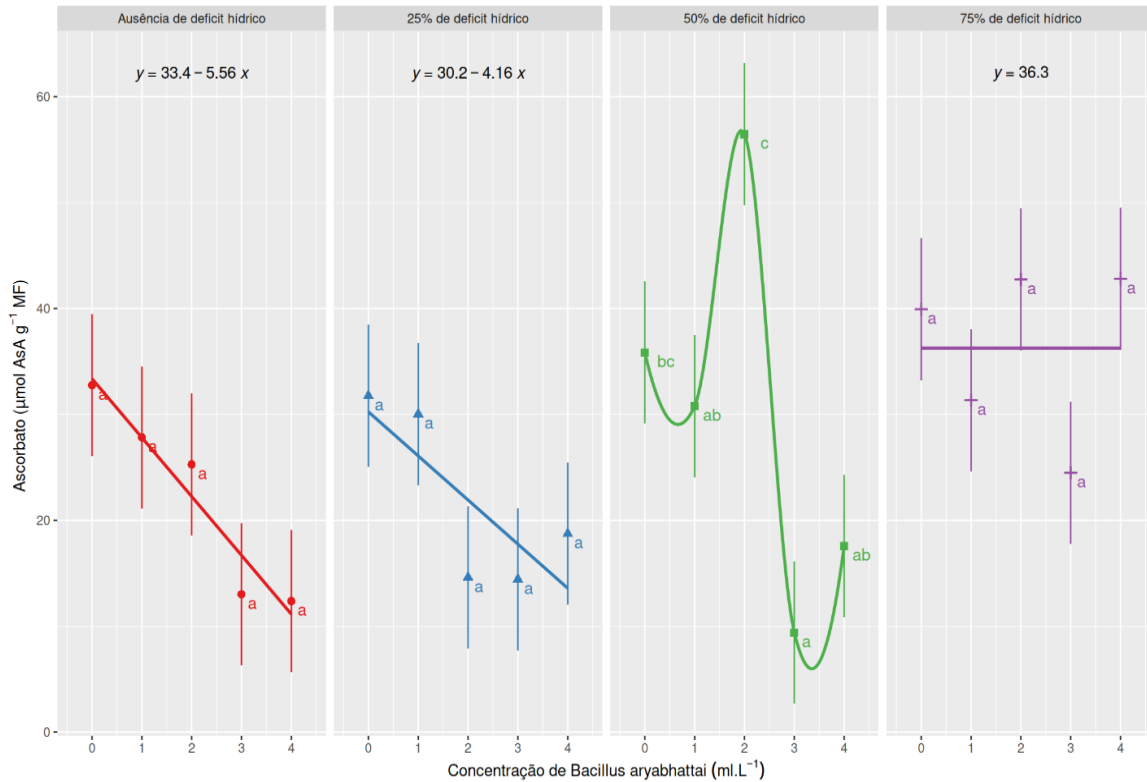


Fonte: Da autora (2025)

4.3.1.5 Quantificação do Ascorbato (ASB)

Em condições sem déficit hídrico (0%) e em déficit leve (25%), observou-se uma redução linear da quantificação de ascorbato (ASB) à medida que se aumentou as concentrações de *Bacillus aryabhattai*. Verificou-se respostas dinâmicas sob déficit moderado (50%), com oscilações na resposta antioxidante. Sob estresse severo (75%), a quantificação do ascorbato permaneceu estável, sugerindo que a inoculação não alterou significativamente a resposta da planta nessa condição (Figura 14).

Figura 14- Gráfico de regressão de ajuste da quantificação do ascorbato em função das concentrações de *Bacillus aryabhattai* aos níveis de déficit hídrico.



Fonte: Da autora (2025)

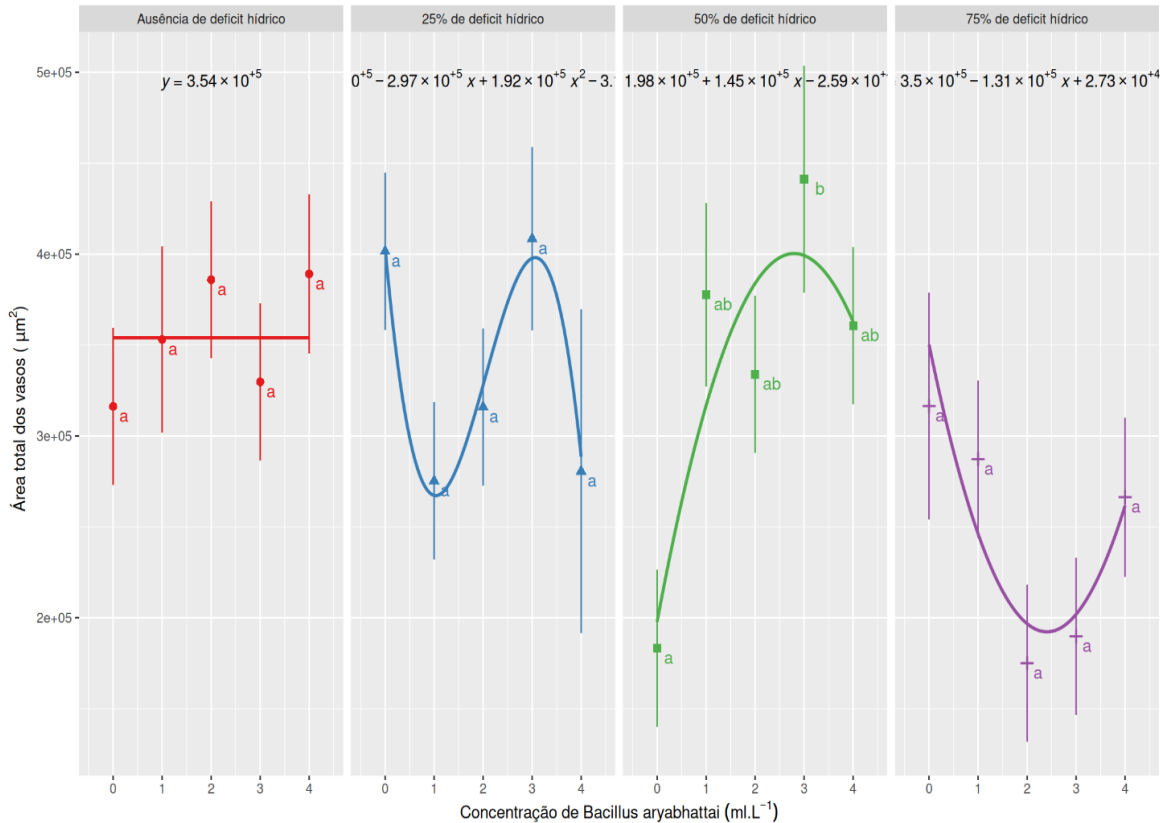
4.4 Características anatômicas

4.4.1 Área total dos vasos (ATV)

Constatou-se que não houve evidências do efeito de *B. aryabhattai* para ATV na ausência de déficit hídrico (0%). Na condição de déficit hídrico de 25%, a ATV reduziu até a concentração de 2,4 mL L⁻¹ e, a partir dessa concentração, o *B. aryabhattai* proporcionou aumento até a concentração de 4 mL L⁻¹ (Figura 15).

Na condição de déficit hídrico de 50%, concentrações de até 3 mL L⁻¹ proporcionaram aumento na ATV quando comparados aos tratamentos sem inoculação. Na condição de 75% de déficit hídrico não houve efeito de *B. aryabhattai*.

Figura 15 - Desdobramento de concentração de *B. aryabhattai* dentro dos níveis de déficit hídrico.



Fonte: Da autora (2025)

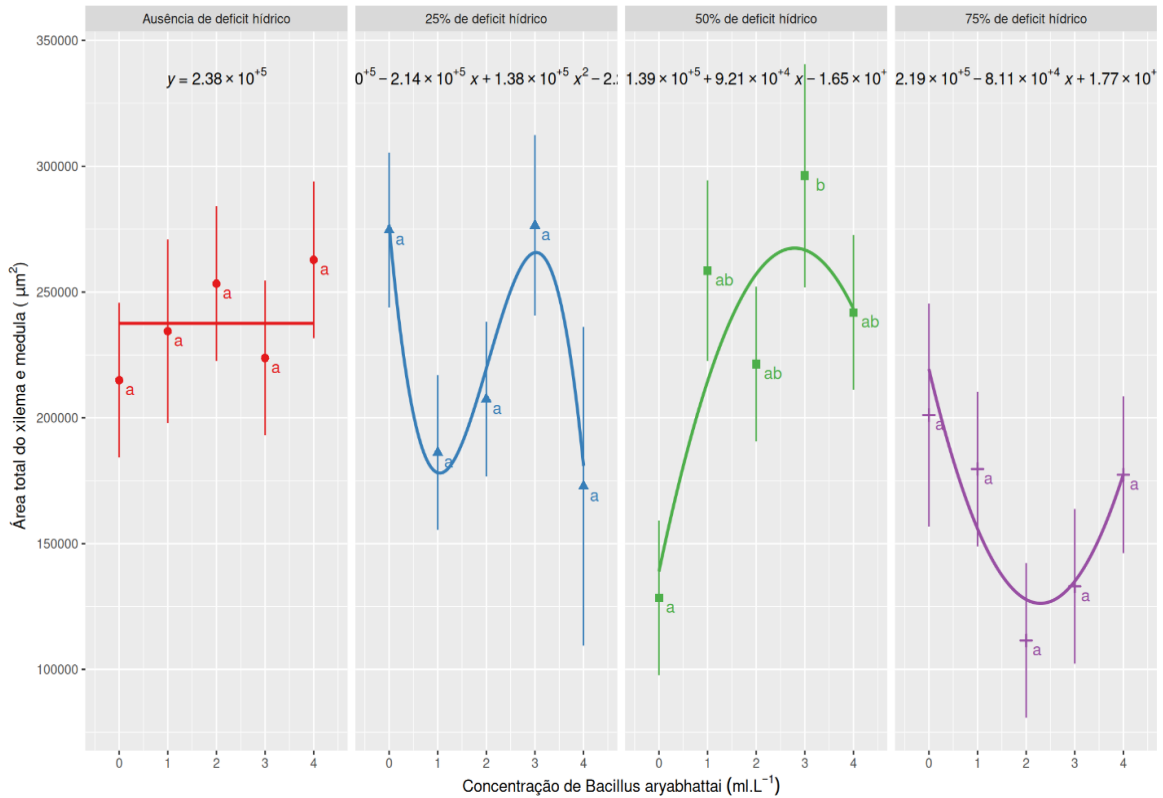
4.4.1 Área total do xilema e medula (ATXM)

Observou-se que na ausência de déficit hídrico (0%) a rizobactéria *B. aryabhattai* não influenciou significativamente a formação do xilema e da medula (Figura 16).

No déficit hídrico de 25%, houve um ponto ótimo de concentração de *Bacillus aryabhattai* na dosagem de 3 ml L⁻¹, que maximizou o crescimento do xilema e da medula, seguido de redução.

Para 50% de déficit hídrico, *Bacillus aryabhattai* influenciou significativamente a área do xilema e da medula, promovendo um aumento inicial até ponto máximo de 3 ml L⁻¹, seguido de redução na dosagem mais alta de 4 ml L⁻¹. No déficit hídrico de 75%, a rizobactéria *B. aryabhattai* não influenciou significativamente a formação do xilema e da medula. (Figura 16).

Figura 16 - Desdobramento de concentração de *B. aryabhattai* dentro dos níveis de déficit hídrico.

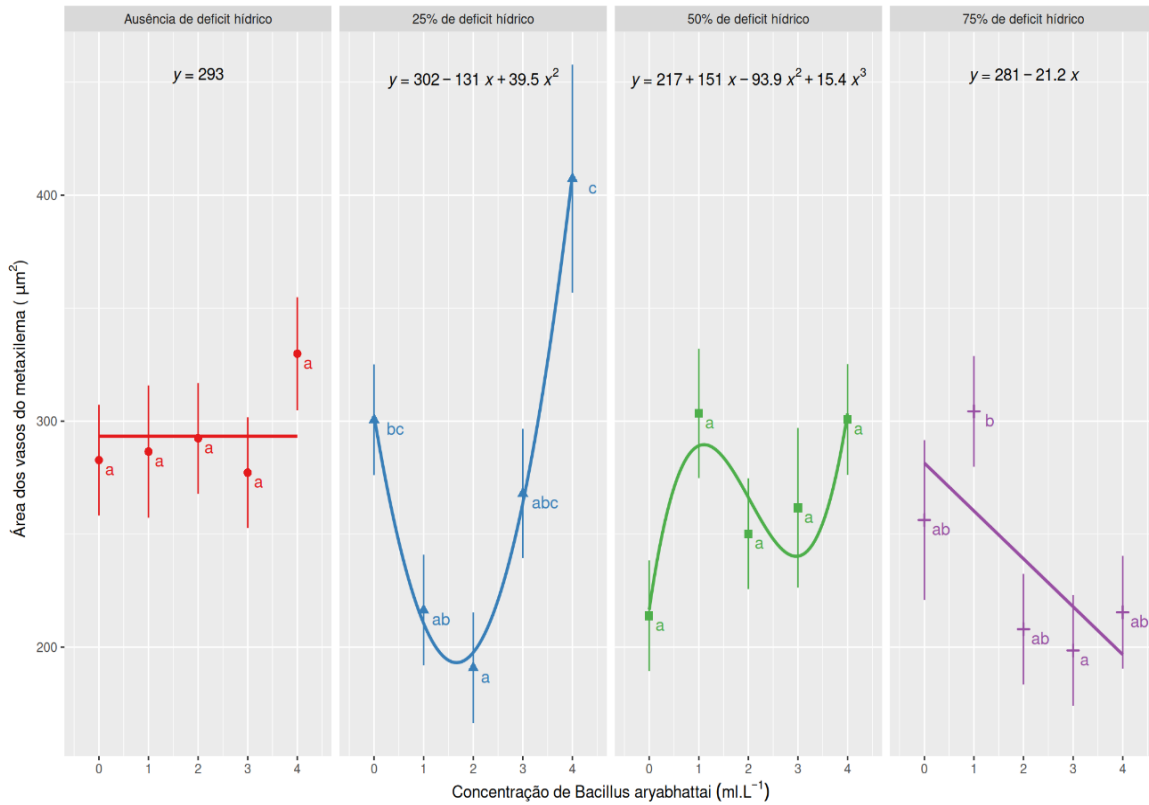


Fonte: Da autora (2025)

4.4.2 Área dos vasos do metaxilema (AMET)

Verificou-se que na ausência de déficit hídrico (0%) a área dos vasos do metaxilema não variou significativamente em função da concentração de *B. aryabhattai*. No déficit hídrico de 25% a melhor dosagem recomendada foi 3 a 4 ml L⁻¹. No nível de 50% de déficit hídrico a melhor dosagem recomendada foi 3 ml L⁻¹. Por fim, com 75% de déficit hídrico a melhor dosagem recomendada foi a de 1 ml L⁻¹ (Figura 17).

Figura 17 - Desdobramento de concentração de *B. aryabhattai* dentro dos níveis de déficit hídrico.



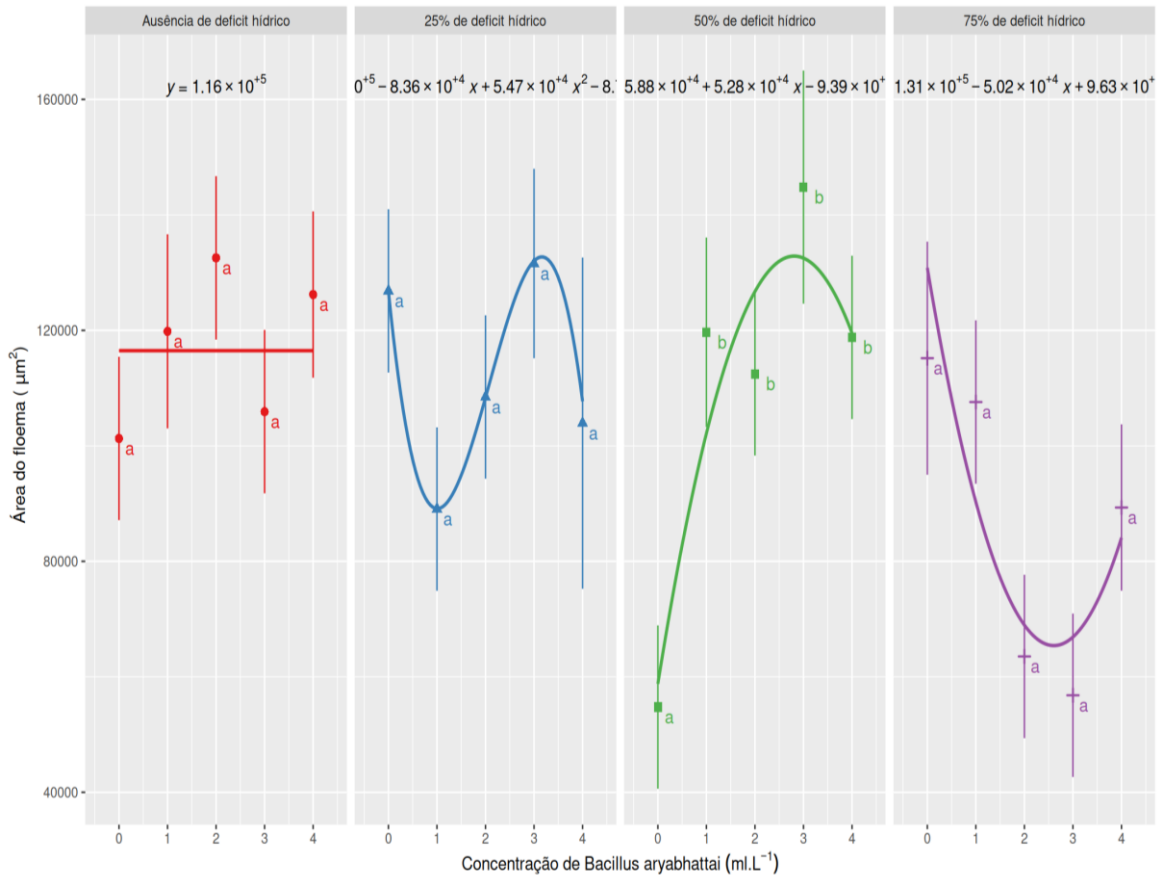
Fonte: Da autora (2025)

4.4.3 Área do floema (AF)

Observou-se que, na ausência de déficit hídrico, a concentração de *B. aryabhattai* não apresentou um efeito significativo na variável resposta área do floema.

Nas condições de 25% observou um aumento AF na dosagem de 3 ml L⁻¹. No déficit hídrico de 50% o aumento da concentração de *Bacillus aryabhattai* teve efeito positivo até um ponto máximo, com a melhor resposta em 3 ml L⁻¹, enquanto doses elevadas não mostraram benefícios adicionais. No déficit hídrico de 75%, a resposta das plantas a *B. aryabhattai* foi mais complexa, com a melhor resposta na dosagem de 1 ml L⁻¹, sugerindo que essa dosagem ajudou a mitigar o estresse severo (Figura 18).

Figura 18 - Desdobramento de concentração de *B. aryabhattai* dentro dos níveis de deficit hídrico.



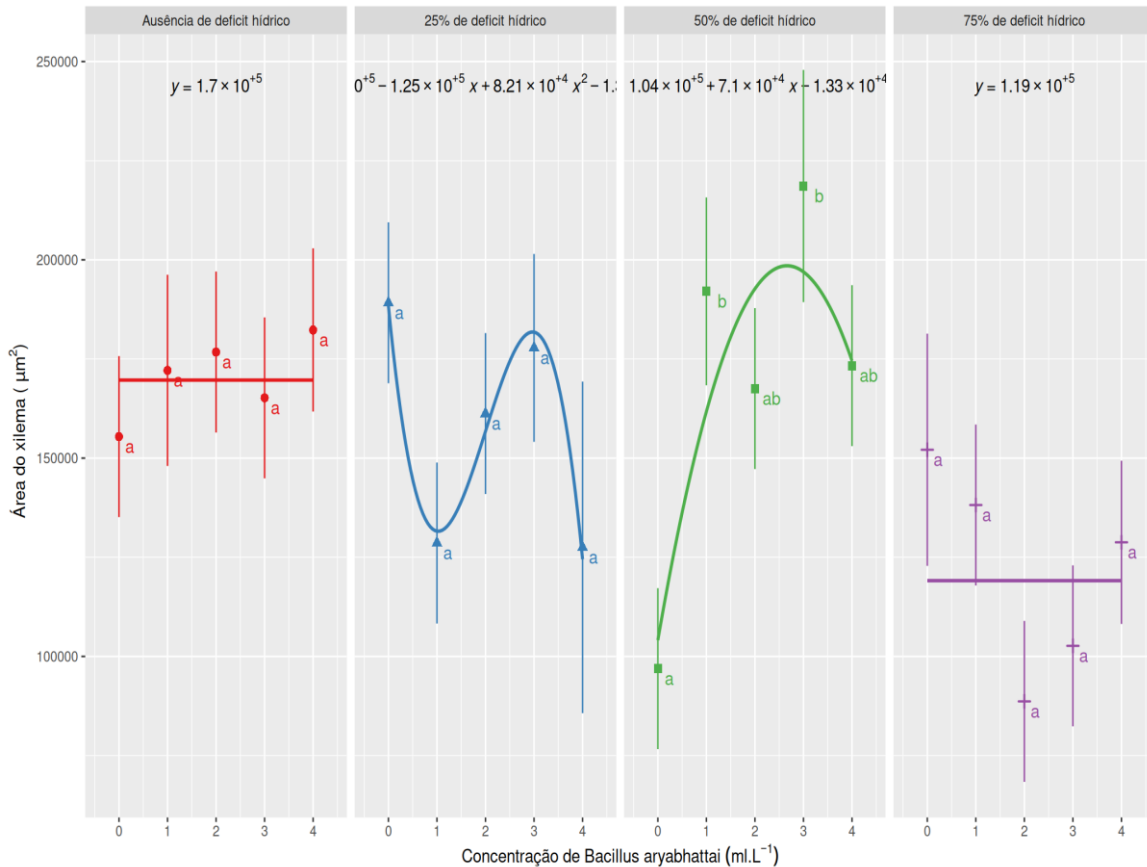
Fonte: Da autora (2025)

4.4.4 Área do xilema (AX)

Verificou-se que, na ausência de déficit hídrico (0%), a *B. aryabhattai* não teve efeito significativo. Para o déficit de 25%, a área do xilema apresentou variação. No déficit de 50%, indicou que a bactéria teve um efeito significativo. Doses como a 1 mL L⁻¹ e 3 mL L⁻¹, apresentou maior AX comparado ao tratamento sem a inoculação (Figura 19).

No déficit de 75%, a relação entre *B. aryabhattai* e a área do xilema foi complexa, com flutuações na resposta.

Figura 19 - Desdobramento de concentração de *B. aryabhattai* dentro dos níveis de déficit hídrico.

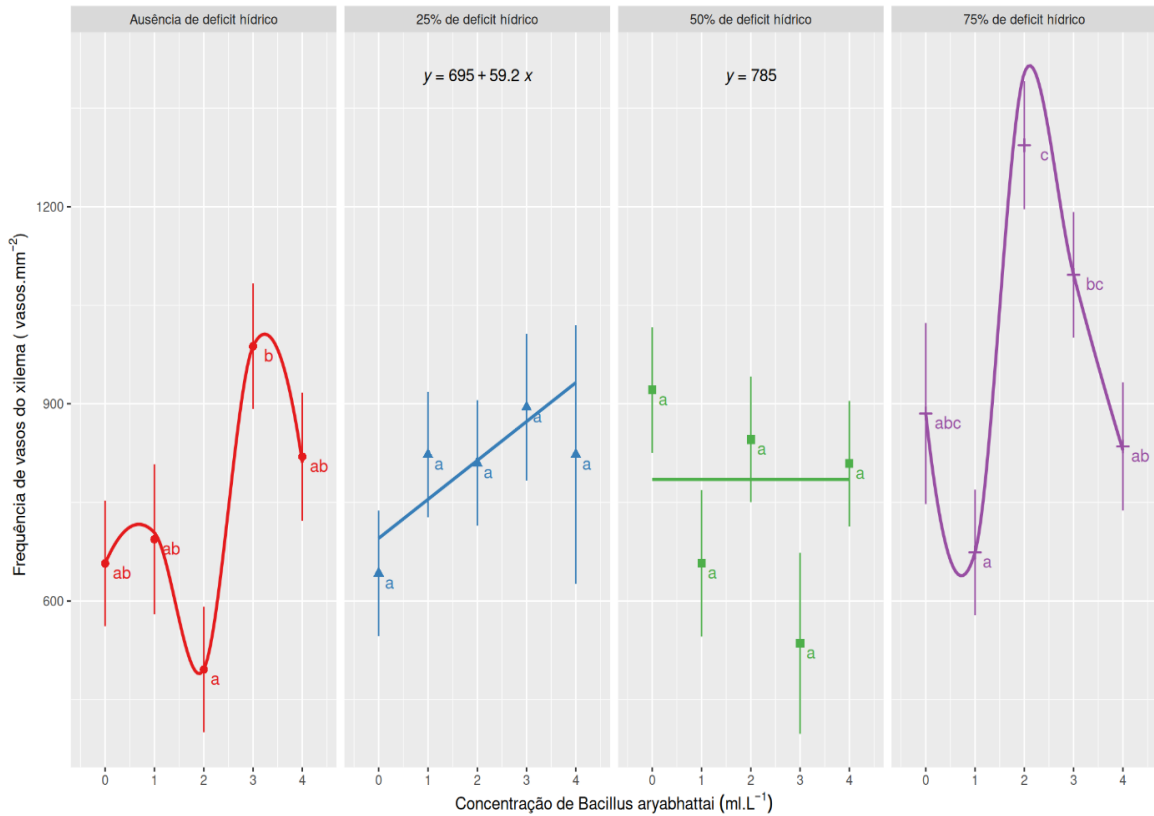


Fonte: Da autora (2025)

4.4.5 Frequência de vasos do xilema (FVX)

Observou-se que em condições sem déficit hídrico (0%) a frequência de vasos do xilema apresentou um comportamento não linear, com variações conforme a concentração de *B. aryabhatai* atingindo um ponto máximo em 3 mL. L⁻¹. No déficit de 25%, a frequência de vasos do xilema aumentou com a concentração de *Bacillus aryabhatai*, mas sem diferenças significativas. No nível de 50% de déficit hídrico, não foi identificada relação entre a concentração de *B. aryabhatai* e a frequência de vasos do xilema. Para 75% de déficit hídrico, mostrou-se um aumento expressivo na frequência de vasos do xilema com o aumento da concentração da bactéria, seguido de uma queda nas concentrações mais altas (Figura 20).

Figura 20 - Desdobramento de concentração de *B. aryabhatai* dentro dos níveis de déficit hídrico.

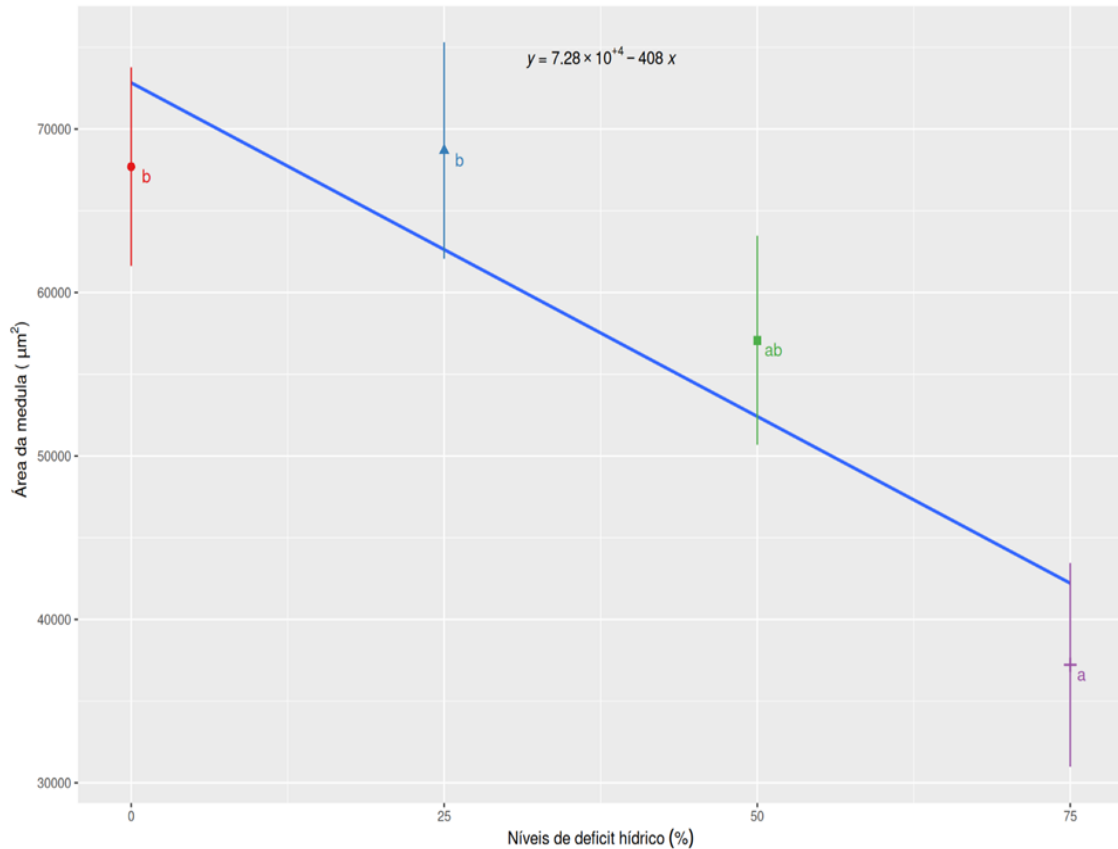


Fonte: Da autora (2025)

4.4.6 Área da medula (AM)

Observou-se que com 0% de déficit hídrico, a área da medula é a maior (~72.000 μm^2). Com 25% de déficit hídrico, a área da medula ainda é alta (~68.000 μm^2) e não apresentou diferença significativa em relação ao grupo sem déficit. No nível de 50% de déficit hídrico, a área da medula reduz para aproximadamente 55.000 μm^2 . No nível de 75% de déficit hídrico, apresentou a menor área da medula (~38.000 μm^2) (Figura 21).

Figura 21 - Gráfico de regressão da área da medula em função dos níveis de déficit hídrico.



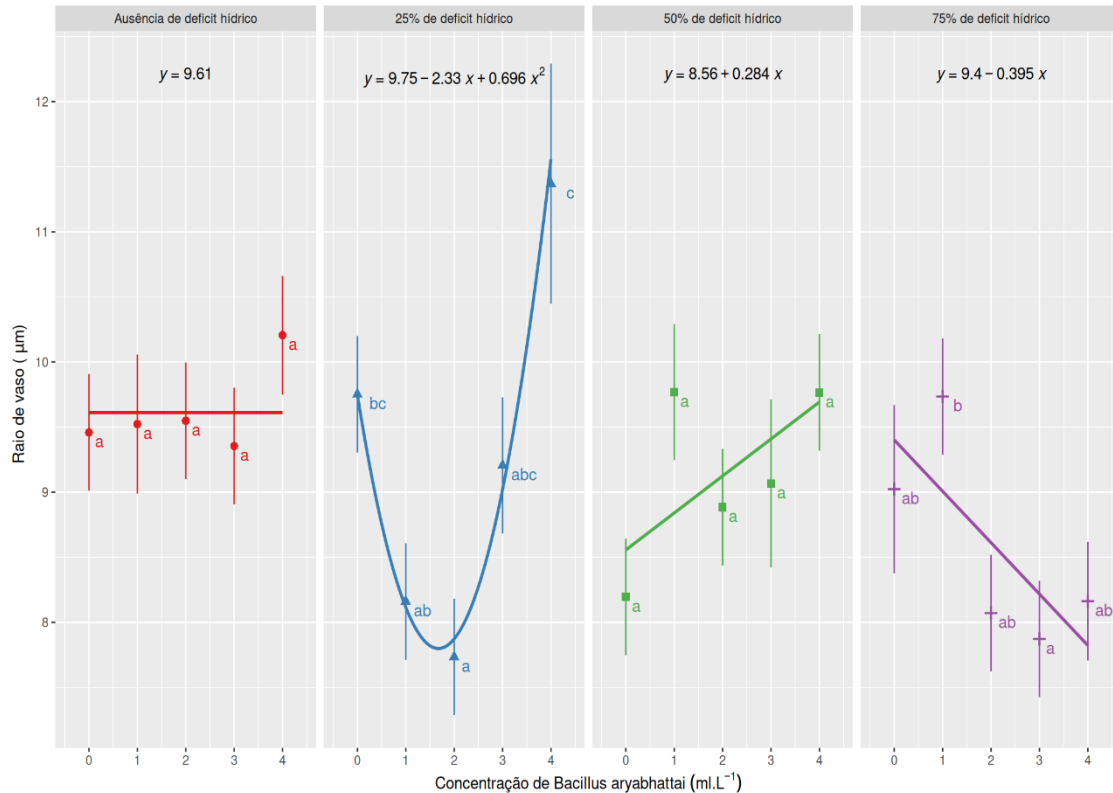
Fonte: Da autora (2025)

4.4.6 Raio dos vasos (RV)

Verificou-se que quando não houve déficit hídrico, os dados sugeriram que a concentração de *Bacillus aryabhatai* não influenciou significativamente o raio do vaso.

No nível de 25%, observou-se que o raio do vaso diminuiu com o aumento da concentração de *Bacillus aryabhatai*, mas depois, aumentou novamente. No nível de 50%, o raio de vaso aumentou gradativamente com a concentração de *Bacillus*. Para o nível de 75% déficit hídrico, o raio de vaso diminuiu conforme a concentração de *Bacillus aryabhatai* aumentou (Figura 22).

Figura 22 - Desdobramento de concentração de *B. aryabhatai* dentro dos níveis de déficit hídrico.

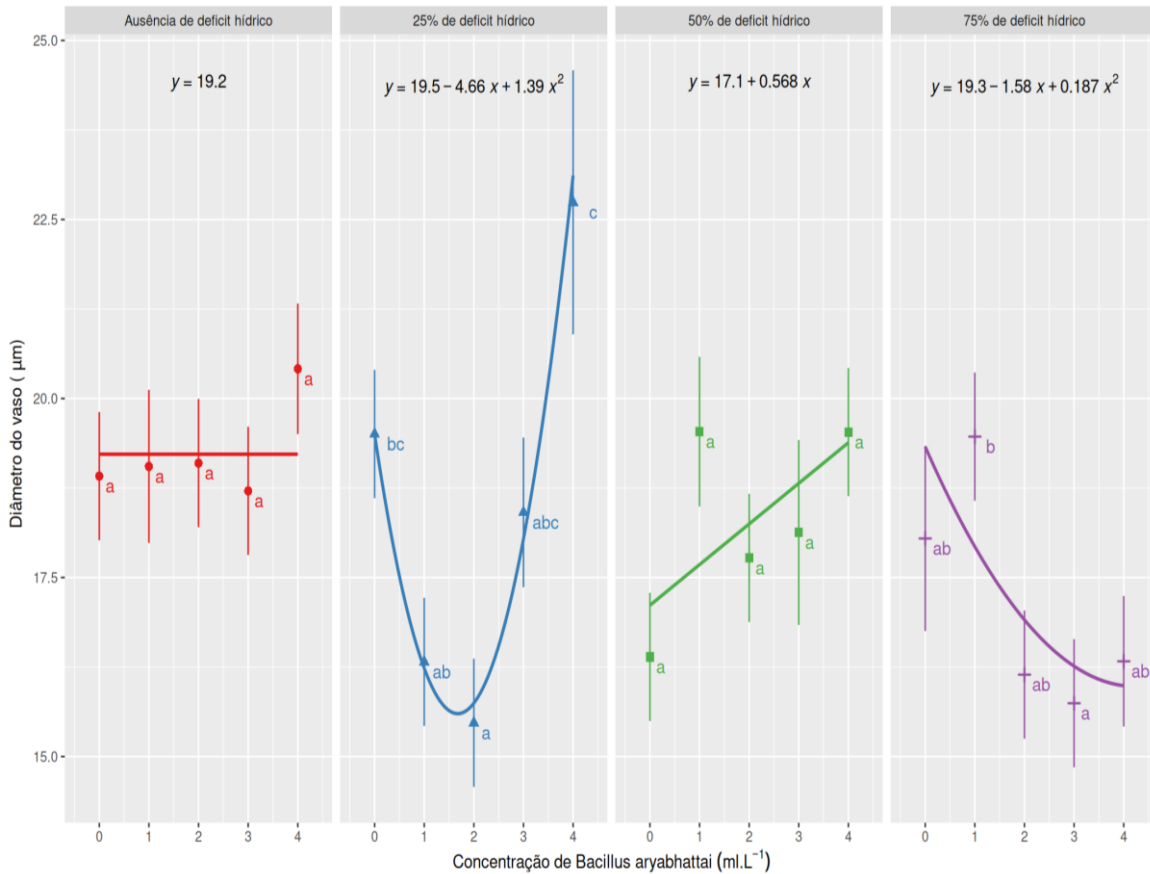


Fonte: Da autora (2025)

4.4.7 Diâmetro de vaso do metaxilema (DVM)

Observou-se que na ausência de déficit hídrico (0%) a aplicação da bactéria não influenciou o diâmetro dos vasos. Considerando o déficit hídrico de 25%, doses entre 1 e 2 ml L⁻¹ de *B. aryabhattai*, observou-se, uma redução no diâmetro do vaso até a dose de 2 ml L⁻¹ indicando um efeito negativo nessas concentrações. No entanto, para 4 ml L⁻¹, o diâmetro aumentou. Para o déficit hídrico de 50%, o diâmetro dos vasos aumentou conforme o aumento da concentração de *Bacillus aryabhattai* aumenta. Já no déficit hídrico de 75% houve uma redução do diâmetro dos vasos a partir da concentração de 2 ml L⁻¹ do inoculante (Figura 23).

Figura 23 - Desdobramento de concentração de *B. aryabhattai* dentro dos níveis de déficit hídrico.

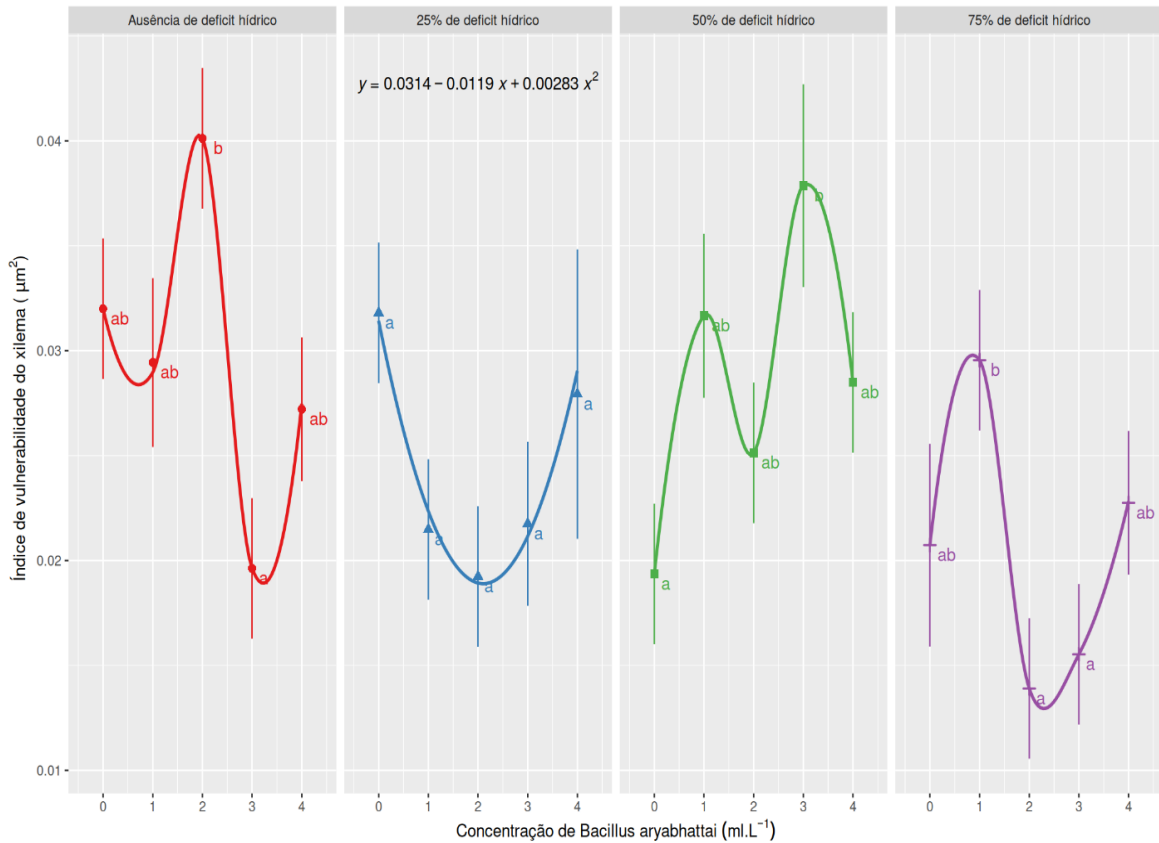


Fonte: Da autora (2025)

4.4.9 Índice de vulnerabilidade do xilema (IVX)

Verificou-se que na ausência de déficit hídrico, a dosagem de 2 ml L⁻¹ houve um aumento no índice de vulnerabilidade do xilema. Para a condição de 25% de déficit hídrico, o comportamento da curva sugeriu-se que concentrações entre 1, 2 e 3 ml L⁻¹ resultaram nos menores valores de vulnerabilidade do xilema. No nível de 50% de déficit hídrico, a curva apresentou oscilações e houve um efeito positivo de *B. aryabhatai* na redução da vulnerabilidade do xilema, especialmente em concentrações ao redor de 3 ml L⁻¹. Para a condição de 75% a curva sugeriu-se que concentrações entre 2 e 3 ml L⁻¹ resultaram em menor IVX (Figura 24).

Figura 24 - Desdobramento de concentração de *B. aryabhatai* dentro dos níveis de déficit hídrico.

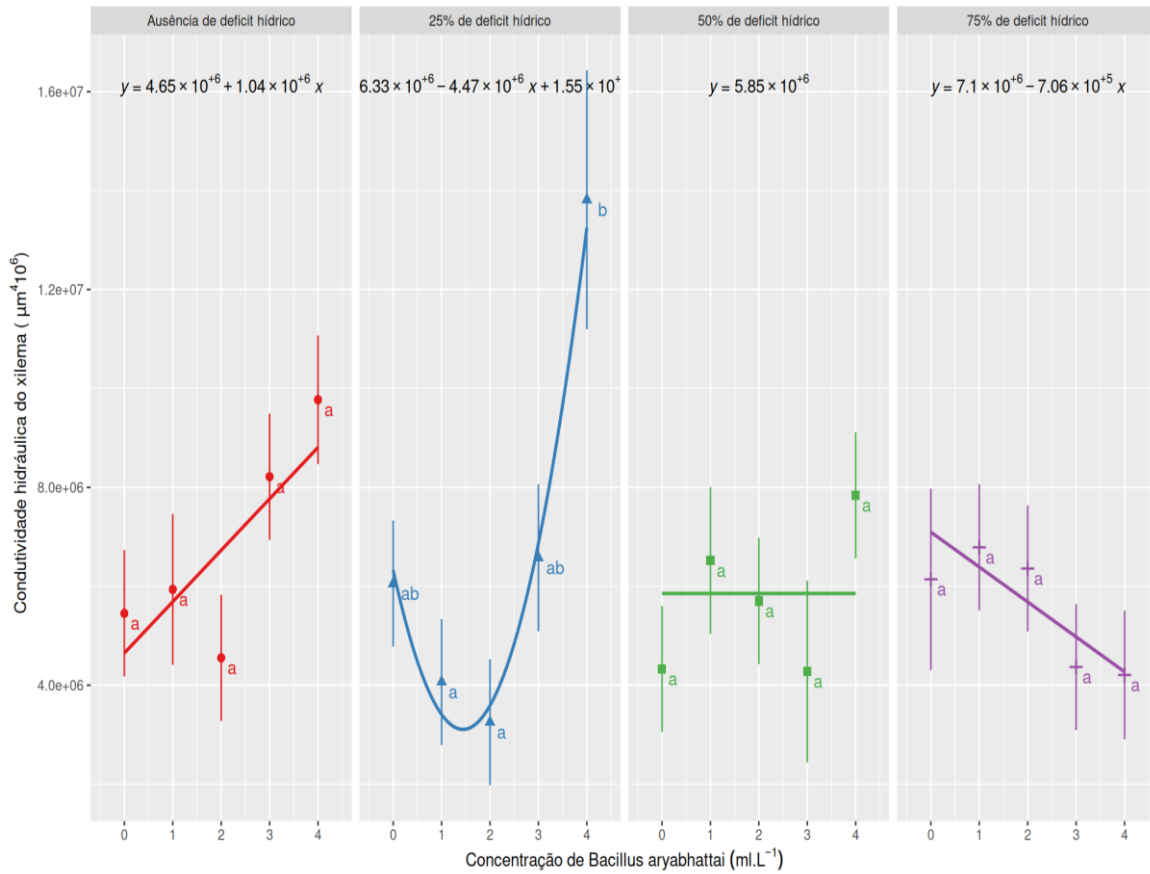


Fonte: Da autora (2025)

4.4.10 Condutividade hidráulica do xilema (CHX)

Constatou-se que o aumento na concentração de *B. aryabhattai* levou a um aumento na condutividade hidráulica do xilema na ausência de déficit hídrico (0%). Nas condições de 25% houve um aumento na CHX na dosagem de 4 ml. L⁻¹ e nas condições de 50% foi possível observar que não houve efeito significativo da bactéria sobre a CHX. Já sob 75% de déficit hídrico, sugeriu que doses mais elevadas da bactéria podem, de fato, reduzir a condutividade do xilema sob condições extremas de déficit hídrico (Figura 25).

Figura 25 - Desdobramento de concentração de *B. aryabhattai* dentro dos níveis de déficit hídrico.

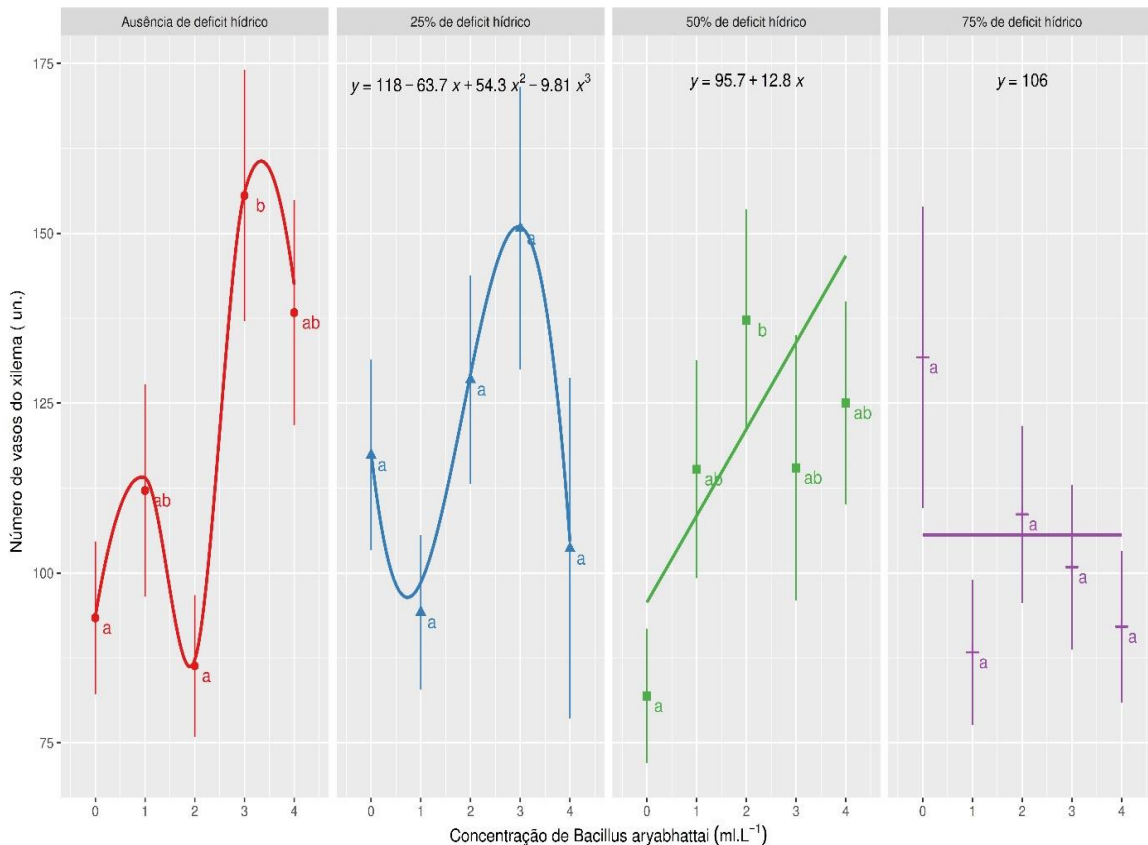


Fonte: Da autora (2025)

4.4.11 Número de vasos do xilema (NVX)

Observou-se que na ausência de déficit hídrico (0%), as concentrações mais elevadas (3 e 4 mL⁻¹) resultaram-se no maior número de vasos do xilema. Para o déficit de 25%, sugeriu-se que, a dosagem de 3 mL. L⁻¹ houve um maior número de vasos do xilema. No déficit de 50%, mostrou-se que houve um aumento linear entre a concentração de *Bacillus aryabhattai* e o número de vasos do xilema. No déficit de 75%, não houve efeito entre a concentração de *Bacillus aryabhattai* e o número de vasos do xilema. (Figura 26).

Figura 26 - Desdobramento de concentração de *B. aryabhattai* dentro dos níveis de déficit hídrico.



Fonte: Da autora (2025)

4 DISCUSSÃO

As plantas adotam diversas estratégias para lidar com o estresse, incluindo alterações em sua anatomia, morfologia, fisiologia e bioquímica, as quais podem diferir conforme as condições do ambiente (DaMATTA, 2003).

Os resultados morfológicos evidenciaram que o estresse hídrico reduziu significativamente a altura das plantas e o diâmetro do caule, sendo que os maiores valores foram observados no tratamento sem déficit hídrico (0%) e os menores sob maior restrição (75%), comportamento semelhante ao relatado em estudos que destacam o papel da irrigação no crescimento inicial do cafeeiro e a diminuição no desenvolvimento sob condições de déficit, com efeitos variando conforme o nível de reposição hídrica (SANTANA *et al.*, 2004; ALVES *et al.*, 2000; SILVA *et al.*, 2003; FERREIRA FILHO *et al.*, 2008; ARAÚJO *et al.*, 2011).

A disponibilidade de água é essencial ao crescimento vegetal por influenciar processos metabólicos, a fotossíntese e o transporte de solutos (TAIZ & ZEIGER, 2013). A limitação hídrica compromete diretamente a expansão celular ao reduzir o turgor e, indiretamente, ao causar estresse oxidativo e degradação da clorofila, o que

diminui a taxa fotossintética (MCDOWELL *et al.*, 2022; TAIZ *et al.*, 2021). A menor circulação de água também prejudica o fluxo de fotoassimilados entre fonte e dreno, afetando o crescimento. Neste estudo, plantas irrigadas apresentaram maior diâmetro do caule, corroborando Araújo (1982), enquanto o déficit hídrico severo (75%) reduziu esse parâmetro, associado à menor síntese de carboidratos e mobilização de reservas de amido (KOZLOWSKI, 1992). A inoculação com *Bacillus aryabhattai* não teve efeito significativo nos diferentes níveis de déficit hídrico, divergindo de estudos como os de May *et al.* (2019), Park *et al.* (2017) e Ndoung e Santos (2019), que relataram benefícios da bactéria sob estresse, possivelmente devido a variações entre espécies, cultivares ou condições experimentais. Ainda assim, evidências indicam que microrganismos como *B. aryabhattai*, *B. subtilis* e *Trichoderma asperellum* podem favorecer o crescimento sob restrição hídrica por meio da indução de resistência, maior absorção de nutrientes e estímulo fisiológico (SILVIA *et al.*, 2024; MONTEIRO, 2023).

Os resultados deste estudo indicaram que o déficit hídrico influenciou significativamente a massa seca da parte aérea (MSPA), das raízes (MSR) e total (MST). Em condições sem restrição (0%), as plantas apresentaram maior acúmulo de biomassa, enquanto a intensificação do estresse (25%, 50% e 75%) resultou em reduções progressivas, com o menor desempenho observado sob o déficit mais severo (75%). Esses efeitos refletem o impacto negativo da limitação hídrica no desenvolvimento vegetal. A MSPA está diretamente ligada à capacidade fotossintética das folhas (TAIZ & ZEIGER, 2013), e estudos com cafeeiros confirmam sua relevância para a produção de matéria seca (ARAÚJO *et al.*, 2011). A MSR, embora menos abordada, também responde à disponibilidade de água no solo. Pesquisas com cafeeiros arábica e conilon demonstraram maior produção radicular em plantas irrigadas (FIALHO *et al.*, 2010; ARAÚJO *et al.*, 2011; PELOSO *et al.*, 2017), enquanto o déficit reduziu o desenvolvimento inicial (DARDENGO, REIS & PASSOS, 2009).

Neste trabalho, a inoculação com *Bacillus aryabhattai* não influenciou significativamente o acúmulo de biomassa sob diferentes níveis de déficit hídrico. Em contrapartida, May *et al.* (2019) observaram aumento na massa fresca radicular e aérea de cana-de-açúcar inoculada com a bactéria, especialmente na cultivar IAC 911099 sob menor frequência de irrigação. Tais divergências podem ser atribuídas às características da cultura, das condições experimentais ou da interação planta-microrganismo. Silvia *et al.* (2023) também relataram que, embora a inoculação não tenha alterado significativamente o comprimento radicular ou a massa aérea, houve incremento na

massa fresca e seca das raízes com doses específicas de *B. aryabhatai*. Esses resultados sugerem que a bactéria pode atuar como promotora do crescimento radicular, favorecendo a absorção de água e nutrientes, especialmente em situações de estresse hídrico.

O potencial hídrico é amplamente utilizado para avaliar a resposta das plantas ao estresse hídrico (BATISTA *et al.*, 2010; MARRACCINI *et al.*, 2011; PINHEIRO *et al.*, 2005; PRAXEDES *et al.*, 2006). Neste estudo, verificou-se que os diferentes níveis de déficit hídrico influenciaram significativamente esse parâmetro. Em condição sem restrição (0%), os valores mantiveram-se estáveis, enquanto no déficit severo (75%) houve queda acentuada, indicando maior impacto do estresse. Já sob déficits moderados (25% e 50%), os valores foram mais elevados e próximos entre si. Resultados semelhantes foram obtidos por Deuner (2007), que relatou manutenção do potencial hídrico em torno de -0,2 MPa sob capacidade de campo, com reduções expressivas após 12 dias de irrigação limitada. Melo (2008) também observou manutenção do potencial em mudas controle, mas queda progressiva até -3,5 MPa após 30 dias de estresse. Esses achados confirmam que o déficit hídrico afeta significativamente a fisiologia vegetal ao reduzir a disponibilidade de água no solo. A inoculação com *Bacillus aryabhatai* não apresentou efeito significativo em relação aos diferentes níveis de déficit hídrico no presente estudo. No entanto, o estudo de Costa, A. M. (2025) demonstrou que a presença de *Bacillus aryabhatai*, *B. circulans* e *B. haynesii*, tanto nas sementes quanto nas folhas, contribuiu para a manutenção do potencial hídrico médio (Ψ_{md}) em valores similares aos das plantas controle. Esses resultados indicam que certas estirpes bacterianas podem desempenhar um papel importante na redução dos impactos do estresse hídrico, promovendo maior estabilidade hídrica nas plantas.

As clorofilas desempenham um papel fundamental na eficiência fotossintética das plantas, influenciando tanto seu crescimento quanto sua capacidade de adaptação a diferentes condições de cultivo (SILVA *et al.*, 2011; SILVA *et al.*, 2014). São compostos moleculares sofisticados que atuam na absorção da luz, na transmissão de energia e na movimentação de elétrons durante a fotossíntese (TAIZ; ZEIGER, 2017). Podem ser apresentados como umas das variáveis importantes para avaliar o estado fisiológico das plantas (AMARANTE *et al.*, 2009). No presente estudo, não foi identificado efeito significativo dos tratamentos sobre os teores de clorofila A (CLOR_A), clorofila B (CLOR_B) e clorofila total (CLOR_T). Resultados similares foram encontrados por Costa, A. M. (2025), que também não verificou alterações nos

níveis de clorofilas a e b, bem como na área foliar, em plantas de milho submetidas a dez dias de seca. Esses achados indicam que, em determinadas fases do estresse hídrico, algumas respostas fisiológicas das plantas podem permanecer relativamente constantes, possivelmente devido a mecanismos adaptativos que atenuam os efeitos da limitação hídrica em curto prazo.

Os resultados obtidos para a condutância estomática (CONDU) indicam um efeito significativo entre os tratamentos. Observou-se que, à medida que o déficit hídrico se intensifica, ocorre uma redução na condutância estomática. De acordo com Sevanto *et al.* (2018), uma das estratégias utilizadas pelas plantas para lidar com essa condição é o fechamento dos estômatos, reduzindo a perda de água por transpiração. No entanto, essa adaptação pode resultar em menor absorção de CO₂, impactando negativamente a fotossíntese. Barros *et al.* (1997) destacaram que, em situações de baixos potenciais hídricos foliares, o fechamento dos estômatos é uma das primeiras respostas das plantas de cafeeiro para minimizar a perda de água. Estudos realizados em cafeeiros submetidos a baixa disponibilidade hídrica também demonstraram uma redução na condutância estomática em resposta à diminuição do potencial hídrico das folhas (DAMATTA *et al.*, 1991; 1995; 2000). Os achados de Souza *et al.* (2023) indicam que a inoculação com *Bacillus aryabhatai* favoreceu um aumento na condutância estomática, mesmo em condições de restrição hídrica. Esse resultado sugere que a bactéria pode atuar na regulação estomática, possivelmente auxiliando na manutenção da abertura dos estômatos e, conseqüentemente, na troca gasosa, mesmo diante da limitação de água.

A limitação hídrica impõe um estresse significativo às plantas, desencadeando um aumento na produção de espécies reativas de oxigênio (EROs). O acúmulo excessivo dessas moléculas pode causar danos celulares, incluindo oxidação de proteínas, peroxidação de lipídios e alterações no DNA, podendo, em casos extremos, levar à morte da planta (AZAD *et al.*, 2021; GARCÍA-CAPARRÓS *et al.*, 2021; SOARES, 2022). Para minimizar esses impactos, além das adaptações anatômicas e fisiológicas, as plantas ativam mecanismos antioxidantes que desempenham um papel essencial na neutralização das EROs e na manutenção da integridade celular (SOARES, 2022).

No presente estudo, a inoculação com *Bacillus aryabhatai* influenciou significativamente a atividade antioxidante das plantas sob déficit hídrico, promovendo um aumento nas atividades das enzimas catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX).

A ativação dessas enzimas sugere que a bactéria contribui para a redução do estresse oxidativo, auxiliando na adaptação das plantas às condições adversas. Essa hipótese é reforçada por estudos prévios que demonstram o papel das interações entre bactérias e plantas na rizosfera na ativação de respostas fisiológicas voltadas à mitigação dos efeitos de estresses abióticos (MAKSIMOV *et al.*, 2011).

A inoculação de bactérias promotoras de crescimento tem sido amplamente investigada como uma estratégia para aumentar a resiliência das plantas a diferentes tipos de estresse. Nesse contexto, Latef *et al.* (2020) observaram que *Bacillus circulans* mitigou os efeitos negativos do excesso de cobre (Cu) em plantas de milho, promovendo a regulação da produção de osmólitos e o aumento da atividade de enzimas antioxidantes, como CAT e peroxidase (PLX). Além disso, a presença da bactéria reduziu o acúmulo de íons Cu nas raízes e brotos, evidenciando o papel do sistema antioxidante na adaptação das plantas a ambientes adversos.

Resultados semelhantes foram observados por Park *et al.* (2017), que relataram que *B. aryabhatai* SRB02 demonstrou alta tolerância ao estresse oxidativo induzido por H₂O₂. Esse efeito foi atribuído ao aumento na atividade de enzimas antioxidantes, como CAT e superóxido dismutase (SOD), favorecendo a proteção celular contra danos oxidativos e promovendo o crescimento vegetal sob condições de estresse.

A enzima APX, especificamente, apresenta uma afinidade maior pelo H₂O₂ em comparação à CAT, o que a torna mais eficiente na neutralização de EROs sob condições de estresse severo (SHARMA *et al.*, 2012). Estudos realizados com a cultura do café também demonstraram um aumento significativo na atividade de enzimas antioxidantes em resposta a condições estressantes (LIMA *et al.*, 2002; RAMALHO *et al.*, 2018; MATOS, 2020), reforçando a relevância desses mecanismos de defesa. Morais (2018), estudando o consórcio de *Bradyrhizobium japonicum* e *B. aryabhatai*, concluiu que as bactérias mitigaram os efeitos do estresse hídrico nas plantas de soja; também relatou que a atividade da enzima peroxidase pode influenciar nessa tolerância, pois, na condição de estresse, apresentou maior atividade.

No presente trabalho os resultados indicaram que a atividade da superóxido dismutase (SOD) não foi significativamente influenciada pelo déficit hídrico, sugerindo que essa enzima não desempenhou um papel central na resposta antioxidante das plantas. A SOD é a primeira linha de defesa da planta na eliminação de espécies reativas de oxigênio, sendo responsável na dismutação do radical superóxido em H₂O₂ e O₂

(SHARMA *et al.*, 2012; BARBOSA *et al.*, 2014). O peróxido de hidrogênio (H₂O₂) não apresentou efeito significativo de *Bacillus aryabhatai* e os diferentes níveis de estresse hídrico indicando que a produção dessa espécie reativa de oxigênio permaneceu relativamente estável entre os tratamentos.

Entretanto, observou-se um efeito significativo tanto da inoculação da *Bacillus aryabhatai* quanto dos níveis de déficit hídrico na peroxidação lipídica (PLX). No déficit de 0%, a peroxidação lipídica é relativamente baixa e no déficit de 75%, onde o estresse hídrico é mais intenso, a peroxidação lipídica é mais elevada em todas as concentrações de *Bacillus aryabhatai*, embora de forma menos acentuada, sugerindo um possível efeito atenuante da bactéria. Esses achados contrastam com os resultados obtidos por Rasul *et al.* (2021), que relataram uma redução na perda de eletrólitos e no acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs) em plantas submetidas ao estresse hídrico e tratadas com bioestimulantes. Além disso, segundo Shukla e Prithiviraj (2021), os bioestimulantes desempenham um papel protetor contra o estresse oxidativo em plantas cultivadas sob condições adversas, contribuindo para a mitigação da perda de eletrólitos e da peroxidação lipídica. De acordo com CIA *et al.* (2012), a quantificação e observação de peroxidação lipídica nas plantas, pode ser importante na determinação da sensibilidade das culturas frente a um déficit hídrico.

A elevação na atividade das enzimas CAT e APX indica um fortalecimento do sistema antioxidante, atuando na mitigação dos danos causados pelo H₂O₂, produzido pela ação da SOD, contribuindo para a menor peroxidação lipídica (CAMPOS *et al.*, 2019).

O cafeeiro pode recorrer ao sistema antioxidante não enzimático como um mecanismo de proteção ao longo de seu desenvolvimento, inclusive durante a restauração das condições hídricas. Dentre esses compostos, o ascorbato se destaca por sua função crucial na defesa antioxidante, atuando como doador de elétrons em diferentes processos metabólicos, sejam eles mediados por enzimas ou não (SHARMA *et al.*, 2012) e pode estar envolvido na via de biossíntese do tocoferol, um outro composto essencial no metabolismo antioxidante, contribuindo para a proteção celular contra o estresse oxidativo (SZARKA *et al.*, 2012). No presente estudo observou-se uma tendência de redução na quantificação do ascorbato conforme a concentração de *Bacillus aryabhatai* aumenta. Em estudos anteriores, a inoculação com bactérias benéficas mostrou efeitos positivos na resposta das plantas ao estresse hídrico. Sandhya *et al.* (2010) relataram que a inoculação de milho com cinco estirpes de *Pseudomonas*

tolerantes à seca levou a um aumento significativo nas atividades das enzimas antioxidantes quando as plantas foram submetidas ao estresse hídrico, em comparação com as plantas não inoculadas. De forma similar, Vardharajula *et al.* (2011) observaram que a inoculação de milho com espécies de *Bacillus* conferiu maior resistência ao estresse hídrico, promovendo o aumento da atividade das enzimas antioxidantes ascorbato e glutathione peroxidase. Além disso, estudos com outras plantas, como o de Gururani *et al.* (2013), mostraram que a aplicação de diferentes cepas de *Bacillus* resultou em aumentos notáveis nos níveis de enzimas responsáveis pela degradação de espécies reativas de oxigênio (EROS), como catalase (CAT), ascorbato peroxidase e superóxido dismutase, em plantas de batata. Nesse estudo, a atividade de CAT nas plantas inoculadas foi superior à das plantas não tratadas, destacando o potencial das bactérias para mitigar os efeitos do estresse oxidativo.

O sistema vascular das plantas, formado pelo xilema e floema, é essencial, pois sua eficiência no transporte de seiva reduz a necessidade de gasto energético pela planta (CASTRO *et al.*, 2009). O floema atua na condução dos fotoassimilados, e seu maior desenvolvimento estrutural pode favorecer uma maior oferta de nutrientes para a planta (PEREIRA *et al.*, 2008).

O presente estudo mostrou que *Bacillus aryabhatai* influencia a área do floema sob déficit hídrico. Com 25% de déficit, doses mais altas favorecem a recuperação. Em 50%, aumentam a área do floema, indicando um efeito positivo. Já com 75%, doses intermediárias parecem estabilizar a área, sem uma tendência clara. A movimentação de fotoassimilados é fortemente reduzida em períodos de déficit hídrico (DANNOURA *et al.*, 2019). O estresse severo afeta o balanço hídrico das plantas, prejudicando a fotossíntese, a captação de íons, o metabolismo de nutrientes e a redistribuição dos assimilados (SAUD *et al.*, 2016).

O xilema é constituído por dois tipos de vasos lenhosos: as traqueítes, que são contínuas, e os elementos de vasos, que apresentam aberturas, permitindo a passagem facilitada de água (CASTRO *et al.*, 2009). Ele é responsável por transportar água e minerais essenciais ao longo da planta (HACKE *et al.*, 2017).

Neste estudo, observou-se efeito significativo da interação entre *Bacillus aryabhatai* e o déficit hídrico sobre diversas variáveis anatômicas relacionadas ao xilema, como área total do xilema (AX), área total dos vasos (ATV), área total do xilema e medula (ATXM), raio dos vasos (RV), diâmetro dos vasos (DV) e número de vasos do xilema (NVX). A inoculação com *B. aryabhatai* parece ter contribuído para a

manutenção da estrutura do xilema, favorecendo o fluxo de água e prevenindo falhas hidráulicas, especialmente em condições de menor estresse (COSTA, 2025). A integridade dos vasos, refletida por parâmetros como AX, DV e RV, é fundamental para garantir a condução eficiente de água a longas distâncias e evitar a cavitação – ruptura da coluna de água por entrada de ar – comum sob déficit hídrico severo (ANDEREGG, 2015; CHOAT *et al.*, 2016; QUEIROZ-VOLTAN *et al.*, 2014).

A redução no NVX sob estresse hídrico pode ser uma adaptação para minimizar a vulnerabilidade à embolia, já que menos vasos, porém mais espessos ou com paredes mais reforçadas, podem conferir maior segurança hidráulica (CASTRO *et al.*, 2005). Essa resposta foi menos evidente sob estresse severo (75%), quando o efeito da bactéria foi reduzido, indicando que sua eficácia pode ser limitada em condições extremas. Estudos como o de Freitas *et al.* (2016) reforçam essa perspectiva, ao mostrarem que o DV respondeu significativamente à lâmina de irrigação, atingindo o valor máximo com 61,35% da capacidade de campo, enquanto o NVX e a espessura do floema não apresentaram variações expressivas. Isso sugere que, sob irrigação moderada, há maior plasticidade anatômica do xilema.

Área dos vasos do metaxilema (AMET) mostrou um efeito significativo na interação entre *Bacillus aryabhattai* e o déficit hídrico. Com 25% de déficit, observa-se uma redução na área dos vasos em doses intermediárias, mas um aumento com 4 mL. L⁻¹. Para 75% de déficit, a resposta é não linear, mas as doses de 1 mL. L⁻¹ e 4 mL. L⁻¹ parecem ser as mais benéficas. Calzavara *et al.* (2018) observaram um número maior dos elementos do metaxilema das plantas de milho inoculadas com *A. brasilense* em comparação com a planta controle. Fator que resultou em um cilindro vascular mais espesso das plantas, favorecendo o transporte de água e nutrientes, resultando em maior produção de biomassa de raiz e parte aérea, também observaram aumento na taxa de fotossíntese das plantas inoculadas.

O índice de vulnerabilidade está relacionado à quantidade e ao tamanho dos vasos do xilema. Quando esse índice é elevado, as plantas ficam mais vulneráveis à cavitação, uma vez que ele permite avaliar a propensão à embolia em cenários de escassez hídrica e também analisar a eficácia do sistema vascular (MATOS; 2022, CARLQUIST, 1975; CASTRO *et al.*, 2009; RIBEIRO *et al.*, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2018).

O maior índice de vulnerabilidade foi observado no tratamento sem déficit hídrico e com 25% de déficit o IVX parece diminuir para doses intermediárias do

Bacillus aryabhatai. Em déficit de 75% o IVX apresenta flutuações, sugerindo que em condições extremas de seca, a influência do *Bacillus* pode ser mais instável, ou que a planta já está muito comprometida para responder significativamente a *Bacillus aryabhatai*.

A condutividade hidráulica do xilema (CHX) e a frequência de vasos do xilema (FVX) foram significativamente influenciadas pela interação entre *Bacillus aryabhatai* e o déficit hídrico, revelando-se variáveis complementares às características anatômicas previamente discutidas. A CHX está diretamente relacionada ao diâmetro e à quantidade de vasos (MATOS, 2022; OLIVEIRA *et al.*, 2018; SPERRY *et al.*, 2006), parâmetros que também apresentaram variação nas condições do presente estudo. Observou-se que, em déficit moderado (25%), a condutividade aumentou de forma mais expressiva com a maior dose de inoculação, enquanto em 50% houve maior oscilação e, no déficit severo (75%), a tendência foi de estabilização ou leve redução. Esses resultados sugerem que a ação benéfica da bactéria é mais evidente em níveis moderados de estresse, perdendo eficácia sob restrição hídrica intensa.

Embora o aumento no diâmetro dos vasos possa favorecer a CHX, isso não garante, por si só, maior eficiência no transporte de água e nutrientes, pois o fechamento estomático em resposta ao estresse pode limitar esse processo (MATOS, 2022; AMRITPHALE & SHARMA, 2010; SOARES, 2022; TARATIMA *et al.*, 2020). Assim, a condutividade hidráulica é regulada não apenas por atributos estruturais do xilema, como DV e FVX, mas também por respostas fisiológicas coordenadas, como o controle estomático. A relação entre estrutura e funcionalidade é reforçada pelo fato de que, sob estresse, plantas tendem a formar vasos de menor diâmetro e em maior frequência, o que favorece o transporte mais seguro da água, evitando cavitação (SPERRY *et al.*, 1995; PEREIRA *et al.*, 2008).

Além disso, estudos indicam que a condutividade hidráulica não deve ser analisada isoladamente nas folhas, uma vez que outros tecidos e órgãos, como o caule e as raízes, também participam do fluxo contínuo de água dentro da planta (MEIZER *et al.*, 1995; PALLARDY *et al.*, 1995; SPERRY *et al.*, 1995).

5 CONCLUSÕES

O déficit hídrico impactou negativamente o cafeeiro, especialmente em restrições acima de 50%. *Bacillus aryabhatai* mostrou potencial na adaptação ao

estresse hídrico, com efeitos positivos em déficits moderados (25-50%). Em déficit severo (75%), as respostas foram variáveis, indicando que sua eficácia depende da dose e do nível de estresse. Assim, *B. aryabhatai* pode ser uma estratégia promissora para mitigar os efeitos da seca no cafeeiro, desde que aplicado na concentração adequada.

REFERÊNCIAS

- AHLUWALIA, O.; SINGH, P.C.; BHATIA, R. A review on drought stress in plants: Implications, mitigation and the role of plant growth promoting rhizobacteria. *Resources, Environment and Sustainability*, v. 5, n. 100032, p.1-13, 2021.
- ALVES, E. S.; ANGYALOSSY-ALFONSO, V. Ecological trends in the wood of some Brazilian species 1: growth rings and vessels. *IAWA Journal*, v.21 (1), p.3-30, 2000.
- ALVES, M. E. B. *et al.* Crescimento do cafeeiro sob diferentes lâminas de irrigação e fertirrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 2, p. 219- 225, 2000.
- AMRITPHALE, D.; SHARMA, S. K. Xylem hydraulics: Rising up and higher! *Resonance*, [S.l.], v. 15, n. 3, p. 223-231, 2010
- ANDEREGG, W. R. L. *et al.* Pervasive drought legacies in forest ecosystems and their implications for carbon cycle models. **Science**, [S.l.], v. 349, n. 6247, p. 528-532, 2015.
- ARAÚJO, G. L. *et al.* Influência do déficit hídrico no desenvolvimento inicial de duas cultivares de café conilon. **Irriga, Botucatu**, v. 16, n. 2, p. 155-124, 2011.
- ARAÚJO, J. A. C. de. Análise do comportamento de uma população de café Icatu (H-4782-7) sob condições de irrigação por gotejamento e quebra-vento artificial. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) -Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, p.87, 1982.
- AZAD, N. *et al.* Physiological mechanism of salicylic acid in *Mentha pulegium* L. under salinity and drought stress. **Brazilian Journal of Botany**, [S.l.], v. 44, n. 2, p. 1-11, 2021.
- BARROS, R. S.; MOTA, J. W. S. da; DAMATTA, F. M.; MAESTRI, M. Decline of vegetative growth in *Coffea arabica* L. in relation to leaf temperature, water potential and stomatal conductance. **Field Crop Research, Amsterdam**, v. 54, n. 1, p. 65-72, 1997.
- BATISTA, K. D. *et al.* Photosynthetic limitations in coffee plants are chiefly governed by diffusive factors. **Trees**, [S.l.], v. 26, p. 459-468, 2010.
- BIEMELT, S.; KEETMAN, U.; ALBRECHT, G. Re-aeration following hypoxia or anoxia leads to activation of the antioxidative defense system in roots of wheat seedlings. **Plant Physiology**, Rockville, v. 116, n. 2, p. 651-658, 1998.
- CALZAVARA, A. K. *et al.* Associative bacteria influence maize (*Zea mays* L.) growth, physiology and root anatomy under different nitrogen levels. **Plant Biology**, v. 20, n. 5, p. 870–878, 2018.
- CASTRO, E. M.; *et al.* Aspectos anatômicos e fisiológicos de plantas de guaco submetidas a fotoperíodos. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.23, n.3, p.846-850, 2005.
- CASTRO, E. M.; PEREIRA, F. J.; PAIVA, R. **Histologia vegetal: estrutura e função de órgãos vegetativos**. Lavras: UFLA. p. 234. 2009.
- CHIAPPERO, J. *et al.* Plant growth promoting rhizobacteria improve the antioxidant status in *Mentha piperita* grown under drought stress leading to an enhancement of plant growth and total phenolic content. *Industrial Crops and Products*, v. 139, n. 1, p. 1-9, 2019.
- CHOAT, B. *et al.* Noninvasive measurement of vulnerability to drought-induced embolism by

- X-ray microtomography. **Plant Physiology**, [S.l.], v. 170, n. 1, p. 273-282, 2016.
- CIA, M. C. *et al.* Antioxidant responses to water deficit by drought-tolerant and-sensitive sugarcane varieties. **Annals of Applied Biology**, [S.l.], v. 161, n. 3, p. 313-324, 2012.
- COHEN, A. C. *et al.* Azospirillum brasilense ameliorates the response of Arabidopsis thaliana to drought mainly via enhancement of ABA levels. *Physiologia plantarum*, v. 153, n. 1, p. 79-90, 2015.
- COSTA, ANDRÉIA MENDES DA. *Bacillus haynesii*, *B. aryabhatai* e *B. circulans* como aliados na atenuação do estresse hídrico em plantas de milho (*Zea mays L.*). 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Federal Goiano, 2025.
- DAMATTA, F. M. Desempenho fotossintético do cafeeiro em resposta a tensões abióticas. p. Tese (Doutorado em Fisiologia vegetal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 1995.
- DaMATTA, F. M. *et al.* Efeitos do nitrogênio e do déficit sobre as trocas gasosas, composição isotópica do carbono e emissão de fluorescência em *Coffea canephora*. In: **Simpósio de pesquisa dos cafés do Brasil**. v. 2, n. 1, p. 903-906. 2000.
- DARDENGO, M. C. J. D.; REIS, E. F.; PASSOS, R. R. Influência da disponibilidade hídrica no crescimento inicial de cafeeiro conilon. **Bioscience Journal, Uberlândia**, v. 25, n. 6, p. 1-14, 2009.
- DEUNER, S. Sistema antioxidante em mudas de cafeeiro sob condições de déficit hídrico. 65 f. Tese (Doutorado em Fisiologia Vegetal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2007.
- DIAS, A. S., & SANTOS, C. C. (2022). Bactérias promotoras de crescimento de plantas: conceitos e potencial de uso. **Pantanal Editora**. 2022.
- DIMKPA, C. *et al.* Plant rhizobacteria interactions alleviate abiotic stress conditions. *Plant, Cell and Environment*, Hoboken, v.32, n.1, p.1682-1694, 2009.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa. 355 p. 2018.
- FERREIRA FILHO, G. S. *et al.* Crescimento do cafeeiro sob diferentes lâminas de irrigação na região da zona da mata do estado de Rondônia. In: **Congresso brasileiro de pesquisa cafeeira**, 34., [s. n.]. p. 331. 2008.
- FIALHO, G. S. *et al.* Comportamento de plantas de café arábica submetidas a déficit hídrico durante o desenvolvimento inicial. **Idesia, Arica**, v. 28, n. 3, p. 35-39, 2010.
- FREITAS, T. *et al.* Feixes vasculares de mudas de cafeeiro produzidas por estacas sob estresse hídrico. In: Congresso brasileiro de pesquisas cafeeiras, 42., 2016, Serra Negra. **Anais...** Brasília, DF: Embrapa Café, 2016.
- GARCÍA, J. E. *et al.* In vitro PGPR properties and osmotic tolerance of different *Azospirillum* native strains and their effects on growth of maize under drought stress. *Microbiological Research*, v. 202, n. 1, p. 21-29, 2017.
- GARCÍA-CAPARRÓS, P. *et al.* Oxidative stress and antioxidant metabolism under adverse environmental conditions: a review. **The Botanical Review**, [S.l.], v. 87, n. 4, p. 421-466, 2021.

GIANNOPOLITIS, C.N. AND RIES, S.K. Superoxide Dismutases I. Occurrence in Higher Plants. **Plant Physiology**, 59, 309-314. 1997

GLICK, B.R. Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. **Microbiol. Res.** 169, 30– 39, 2014.

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

GURURANI, M. A. *et al.* Plant growth-promoting rhizobacteria enhance abiotic stress tolerance in *Solanum tuberosum* through inducing changes in the expression of ROS-scavenging enzymes and improved photosynthetic performance. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 32, p. 245-258, 2013.

HACKE, U. G. *et al.* An ecophysiological and developmental perspective on variation in vessel diameter. **Plant, cell & environment**, [S.l.], v. 40, n. 6, p. 831-845, 2017.

KAVAMURA, V. N. Bactérias associadas às cactáceas da Caatinga: promoção de crescimento de plantas sob estresse hídrico. 2012. Tese (Doutorado em Microbiologia Agrícola) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

KOZLOWSKI, T.T. Carbohydrates sources and sinks in wood plants. **The Botanical Review**, New York, v. 58, n.2, p.107-222. 1992.

LATEF, A. A. H. A. *et al.* Mitigation of copper stress in maize by inoculation with *Paenibacillus polymyxa* and *Bacillus circulans*. **Plants**, v. 9, n. 11, p. 1513, 2020.

MAKSIMOV IV, ABIZGIL'DINA RR, PUSENKOVA LI. Plant growth promoting rhizobacteria as alternative to chemical crop protectors from pathogens (Review) **Appl Biochem Microbiol.** 2011; 47:333–345.

MARRACCINI, P. *et al.* RBCS1 expression in coffee: *Coffea* orthologs, *Coffea arabica* homeologs, and expression variability between genotypes and under drought stress. **BMC Plant Biology**, [S.l.], v. 11, n. 1, p. 85, 2011.

MASCARANHAS, L. S. Uso de inoculantes microbiológicos para otimização do crescimento e desenvolvimento de plantas de cana-de-açúcar cultivadas sob déficit hídrico. 2021. Embrapa Clima Temperado-Tese/dissertação (ALICE), 2021. 98 f. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) - Instituto de Biologia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

MCDOWELL, N. G. *et al.* Mechanisms of woody-plant mortality under rising drought, CO₂ and vapour pressure deficit. **Nature Reviews Earth & Environment**, [S.L.], v. 3, n. 5, p. 294-308, 29 mar. 2022.

MELO, E. F. *et al.* Anatomic and physiological modifications in seedlings of *Coffea arabica* culti var siriema under drought conditions. **Ciencia e Agrotecnologia**, [S.l.], v. 38, p. 25-33, 2014

MELO, E. F. Modificações ecofisiológicas, bioquímicas e anatômicas em cafeeiro progênie siriema sob deficiência hídrica. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fisiologia Vegetal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, p.72, 2008.

MENGUTAY, M. *et al.* Adequate magnesium nutrition mitigates adverse effects of heat stress on maize and wheat. **Plant Soil.**, v. 368, p. 57–72, 2013.

MONTEIRO, E. P. Desenvolvimento inicial de milho inoculado sob estresses salino e hídrico.

25 f. TCC (Graduação) - Curso de Agronomia, Instituto de Desenvolvimento Rural, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-brasileira, Redenção-Ceara, 2023.

MORAIS, J. F. A. Avaliação de consórcios bacterianos para mitigar os efeitos de estresse hídrico em cultura de soja. Piracicaba 2018 39 f. (Dissertação de Mestrado) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Piracicaba 2018

NAKANO, Y.; ASADA, K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. **Plant and Cell Physiology**, Oxford, v. 22, n. 5, p. 867- 880, 1981.

OLIVEIRA, I. *et al.* Compared leaf anatomy and water relations of commercial and traditional *Prunus dulcis* (Mill.) cultivars under rain-fed conditions. **Scientia Horticulturae**, [S.l.], v. 229, p. 226-232, 2018

PAIVA, J. G. A. *et al.* Verniz vitral incolor 500@: a mounting medium alternative and economically viable. *Acta Bot. Bras.*, [S.l.], v. 20, p. 257-264, 2006.

PALLARDY, S.G. *et al.* Water transport dynamics in trees and stands. In *Resource Physiology of Conifers: Acquisition, Allocation, and Utilization*. Eds. W.K. Smith and T.M. Hinckley. **Academic Press**, San Diego, p. 301-389, 1995.

PARK, Y. G. *et al.* *Bacillus aryabhatai* SRB02 tolerates oxidative and nitrosative stress and promotes the growth of soybean by modulating the production of phytohormones. 2017.

PEREIRA. *et al.* Milho Verde. **EMBRAPA Milho e Sorgo**. 2018.

PINHEIRO, H. A. *et al.* Drought tolerance is associated with rooting depth and stomatal control of water use in clones of *Coffea canephora*. **Annals of botany**, [S.l.], v. 96, n. 1, p. 101-108, 2005.

PRAXEDES, S. C. *et al.* Effects of long-term soil drought on photosynthesis and carbohydrate metabolism in mature robusta coffee (*Coffea canephora* Pierre var. *kouillou*) leaves. **Environmental and Experimental Botany**, Elmsford, v. 56, n. 3, p. 263–273, 2006.

QUEIROZ-VOLTAN, R. B. *et al.* Caracterização da anatomia foliar de cafeeiros arábica em diferentes períodos sazonais. **Biotemas**, Florianópolis, v. 27, n. 4, p. 1-10, 2014.

RASUL, F. *et al.* Priming with a Seaweed Extract Strongly Improves Drought Tolerance in *Arabidopsis*. **Int. J. Mol. Sci.**, v. 22, n. 1469, 2021.

RIBEIRO, M. L. R. C.; BARROS, C. F. Variação intraespecífica do lenho de *Pseudopiptadenia contorta* (DC.) G.P. Lewis & M.P. Lima (Leguminosae - Mimosoideae) de populações ocorrentes em dois remanescentes de Floresta Atlântica. **Acta Botânica Brasílica**, v.20, p. 839-844, 2006.

RIBEIRO, M. N. O. *et al.* Anatomia foliar de mandioca em função do potencial para tolerância à diferentes condições ambientais. **Revista Ciência Agrônômica**, [S.l.], v. 43, n. 2, p. 354-361, 2012.

SANDHYA, V. *et al.* Effect of plant growth promoting *Pseudomonas spp.* on compatible solutes, antioxidant status and plant growth of maize under drought stress. **Plant Growth Regulation**, v. 62, p. 21-30, 2010.

SANTANA, MÁRCIO S. *et al.* Crescimento inicial de duas cultivares de cafeeiro adensado influenciado por níveis de irrigação localizada. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v. 24, n. 3, p. 644-653, 2004.

SAUD, S. *et al.* Silicate application increases the photosynthesis and its associated metabolic activities in Kentucky bluegrass under drought stress and postdrought recovery. **Environmental Science and Pollution Research**, v.23, p.4755, 2016

SEVANTO, S. *et al.* Is desiccation tolerance and avoidance reflected in xylem and phloem anatomy of two coexisting arid-zone coniferous trees. **Plant, cell & environment**, [S.l.], v. 41, n. 7, p. 1551-1564, 2018.

SHIVAJI, S., *et al.* Janibacter hoyleisp nov., *Bacillus isronensi* ssp nov. and *Bacillus aryabhataisp* nov., isolated from cryotubes used for collecting air from the upper atmosphere. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, v. 59, p.2977-2986. 2009.

SHUKLA, P. S.; PRITHIVIRAJ, B. Ascophyllum nodosum biostimulant improves the growth of *Zea mays* grown under phosphorus impoverished conditions. **Front Plant Science**, v. 8 n. 11, 2021.

SILVA, A. L. da.; FARIA, M. A.; REIS, R. P. Viabilidade do Sistema de Irrigação por Gotejamento na Cultura do Cafeeiro (*Coffea arabica* L.). In: **Simpósio brasileiro de pesquisa em cafeicultura irrigada**. p. 25-29. 2003.

SILVA, IGOR PEREIRA DE CASTRO E; SILVA, WELLINGTON FERRARI DA. Tolerância ao déficit hídrico na germinação de sementes de soja tratadas com *Bacillus aryabhatai*. **Revista Cerrado Agrociências**, v. 14, 2023.

SILVA, M. A. *et al.* Pigmentos fotossintéticos e índice SPAD como descritores de intensidade do estresse por deficiência hídrica em cana-de-açúcar. **Bioscience Journal**, [S.l.], v. 30, n. 1, 2014.

SILVA, M. C. A. P. *et al.* With a little help from my friends: inoculation with *Bacillus amyloliquefaciens* and *Trichoderma asperellum* alleviates drought and salt stress in soybean. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, p. 1-15, 2023^a

SILVA, N. F. *et al.* Manejo do déficit hídrico em plantas de soja via aplicação de microrganismos e bioestimulantes. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 13, 2024.

SILVA, V. A. *et al.* Resposta fisiológica de clone de café Conilon sensível à deficiência hídrica enxertado em porta-enxerto tolerante. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 5, p. 457-464, maio 2010.

SILVEIRA, H. R. de O. *et al.* Impactos da deficiência hídrica nas respostas ecofisiológicas e espectrais do cafeeiro consorciado com espécies madeireiras. **Coffee Science, Lavras**, v. 11, n. 3, p. 318-329, 2016.

SOUSA, H. C. *et al.* Respostas fisiológicas de milho inoculado sob estresses salino e hídrico. In: **VIII Inovagri International Meeting e XXXII CONIRD**. Fortaleza: Colibri. p. 4- 5, 2023.

SOUZA, Karina da Silva. Coinoculação de microrganismos associada a doses de silício na nutrição, componentes produtivos e produtividade da soja. 2024. 42 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - Unesp, Ilha Solteira, 2024.

SPERRY, J.S. Limitations on stem water transport and their consequences. In *Plant Stems: Physiology and Functional Morphology*. Ed. B.L. **Gartner**. **Academic Press**, San Diego, p.

105-124, 1995.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia vegetal. 5. ed. Porto Alegre: **Artmed**, 954p, 2013.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. Fundamentos de Fisiologia Vegetal. 1. ed. **Artmed Editora**, 2021.

TARATIMA, W. *et al.* Effect of stress on the leaf anatomy of sugarcane cultivars with different drought tolerance (*Saccharum officinarum*, Poaceae). **Revista de Biologia Tropical**, [S.l.], v. 68, n. 4, p. 1159-1170, 2020.

TEIXEIRA, M. B. Bactérias promotoras de crescimento como atenuantes do estresse hídrico no milho - **Instituto Federal Goiano Campus Rio Verde**. 2024.

VARDHARAJULA, S.; *et al.* Drought-tolerant plant growth promoting *Bacillus spp.*: effect on growth, osmolytes, and antioxidant status of maize under drought stress. **Journal of Plant Interactions**, v. 6, n. 1, p. 1-14, 2011.

VELIKOVA, V.; YORDANOV, I.; EDREVA, A. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants: protective role of exogenous polyamines. **Plant Science, Clare**, v. 151, n. 1, p. 59-66, 2000.

TERCEIRA PARTE

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O déficit hídrico impactou significativamente a morfologia e a fisiologia do cafeeiro, reduzindo variáveis como altura, diâmetro do caule e biomassa, com efeitos mais severos acima de 50% de restrição. A condutância estomática diminuiu progressivamente, evidenciando o fechamento estomático como estratégia de conservação hídrica, enquanto os teores de clorofila permaneceram inalterados.

Os resultados indicaram que *Bacillus aryabhattai* modula a resposta antioxidante das plantas de forma dependente do déficit hídrico e da concentração aplicada. A atividade da APX aumentou com a inoculação e a restrição hídrica, enquanto a CAT apresentou uma tendência de aumento sem um padrão definido. A PXL mostrou efeito protetor em doses baixas e indutor de estresse em concentrações elevadas, e o ASB teve redução sem déficit hídrico, variação sob estresse moderado e estabilidade sob estresse severo. Esses achados reforçam o potencial de *B. aryabhattai* na adaptação ao estresse hídrico, desde que aplicado na concentração adequada.

Bacillus aryabhattai influenciou a anatomia das plantas sob estresse hídrico, com efeitos dependentes da severidade do déficit e da concentração aplicada. Na ausência de estresse (0%), a bactéria não apresentou impacto significativo na maioria das variáveis analisadas. Sob déficit moderado (25% e 50%), observou-se um efeito positivo em diversas estruturas do xilema e floema, especialmente em concentrações entre 2 e 3 mL L⁻¹, favorecendo o crescimento e a adaptação da planta. No déficit severo (75%), as respostas foram mais complexas, com algumas

variáveis mostrando benefícios em doses intermediárias, enquanto concentrações elevadas reduziram certos parâmetros anatômicos. Além disso, *B. aryabhatai* influenciou a frequência e o diâmetro dos vasos do xilema, modulando a condutividade hidráulica e a vulnerabilidade do tecido vascular, principalmente sob déficit severo. No entanto, os efeitos foram variáveis, sugerindo que a resposta da planta à bactéria depende do nível de estresse hídrico e da concentração utilizada.

Esses resultados reforçam o potencial de *B. aryabhatai* na mitigação do estresse hídrico, desde que a aplicação seja ajustada conforme a severidade do déficit.