



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**EFEITOS DA ARBOLINA® E DE LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO SOBRE ATRIBUTOS
BIOQUÍMICOS, FISIOLÓGICOS E MORFOLÓGICOS DE FEJJOEIRO**

LUCAS ANTÔNIO MAZOCCO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA

BRASÍLIA/DF

JULHO/2024



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**EFEITOS DA ARBOLINA® E DE LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO SOBRE ATRIBUTOS
BIOQUÍMICOS, FISIOLÓGICOS E MORFOLÓGICOS DE FEJJOEIRO**

LUCAS ANTÔNIO MAZOCCO

ORIENTADOR: PROF. DR. JADER GALBA BUSATO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA

BRASÍLIA/DF

JULHO/2024



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**EFEITOS DA ARBOLINA® E DE LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO SOBRE ATRIBUTOS
BIOQUÍMICOS, FISIOLÓGICOS E MORFOLÓGICOS DE FEIJOEIRO**

LUCAS ANTÔNIO MAZOCCO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM AGRONOMIA.**

APROVADA POR:

PROF. DR. JADER GALBA BUSATO

(Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – FAV/UnB)

PROF. DR. DELVIO SANDRI

(Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – FAV/UnB)

PROF. DR. LEONARDO BARROS DOBBSS

(Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - UFVJM)

BRASÍLIA, 08 DE JULHO DE 2024

FICHA CATALOGRÁFICA

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MAZOCCO, L. A. **Efeitos da Arbolina[®] e de lâminas de irrigação sobre atributos bioquímicos, fisiológicos e morfológicos de feijoeiro.** Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2024, 102 p. Dissertação de Mestrado.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Lucas Antônio Mazocco

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Efeitos da Arbolina[®] e de lâminas de irrigação sobre atributos bioquímicos, fisiológicos e morfológicos de feijoeiro.

GRAU: Mestre

ANO: 2024

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado para única e exclusivamente propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais, de publicação. Nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada à fonte.

Nome: Lucas Antônio Mazocco

CPF: 052.186.461-56

Endereço: QI 23 Lote 2 Bloco G Apt. 213 – Guará II – Brasília (DF)

Tel: +55 61 99616-4663

Email: mazocco.lucas@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Espiritualidade que abençoa e guia minha vida e minhas escolhas, iluminando a minha jornada e fortificando-me em todos os momentos desafiadores.

Ao Prof. Dr. Jader, pela orientação e dedicação em compartilhar seus conhecimentos, assim como pela sua compreensão e paciência ao longo dessa experiência que fará extrema diferença para o meus futuro profissional e pessoal.

À Prof^ª. Dr^ª. Alessandra, por todo o suporte e pelas diversas partilhas.

Aos convidados da Banca Examinadora, Prof. Dr. Delvio e Prof. Dr. Leonardo, pelo tempo e esforço para colaborações e sugestões do presente trabalho.

Ao Corpo Docente da Faculdade de Agronomia e Veterinária (FAV), ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia e à Universidade de Brasília (UnB).

Ao apoio da CAPES – Código de Financiamento 001.

Aos amigos do Laboratório de Química do Solo da FAV pelo companheirismo e por toda a ajuda em atividades, inclusive em campo.

À equipe do Laboratório Multidisciplinar de Pesquisas em Sistemas Agropecuários da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) por todo o auxílio prestado.

Aos Profs. Drs. Márcio e Ernandes, pela auxílio junto ao Laboratório de Bromatologia e Tecnologia de Alimentos da FAV.

Aos funcionários da Estação Experimental de Biologia da UnB.

À empresa Tecnoponia, pelo excelente profissionalismo em todas as assistências.

À pesquisadora Bárbara (Embrapa Agroenergia) por toda a ajuda.

À toda equipe da Krilltech, por todo auxílio e fornecimento do produto.

Aos amigos Bernardo, Caroline, Iasminy, Rhyllary, Scheila e Sérgio por tamanha gentileza, esforço e amizade em terem me auxiliado em diversos momentos nessa trajetória.

A todos os amigos xamânicos pelo amor, amizade e apoio incondicional, desde quando comecei a me entender por gente (novamente).

À família Coátio, por tudo e mais um pouco.

À minha prima, Caroline, por todo apoio e incentivo ao ter me direcionado (de volta) para a ciência.

A toda minha família, em especial meu pai, mãe e irmã, Idézio, Carmem e Larissa. Serei eternamente grato pelos princípios ensinados e por todos os esforços para me verem bem.

Ao Universo, pelo momento em que percebo que tudo valeu a pena.

Por fim, a todos que estiveram ao meu lado durante esse intervalo de espaço-tempo, de todas as maneiras, agradeço imensamente.

RESUMO

Na agricultura, fertilizantes, pesticidas e sistemas de irrigação têm sido utilizados com frequência na perspectiva de aumentar o rendimento dos cultivos. Contudo, muitas questões associadas à exaustão das reservas minerais, a contaminação de compartimentos ambientais e dos agricultores e as limitações de acesso à água tem impulsionado pesquisas de novos insumos agrícolas. Nesse sentido, produtos à base de *Carbon Dots* (CDs) (e.g., Arbolina®) tem tido destaques. O presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da aplicação de Arbolina® sobre respostas bioquímicas, fisiológicas e morfológicas em feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivar BRS Radiante, submetido à diferentes lâminas de irrigação. Inicialmente foi realizado um ensaio de concentração-resposta empregando-se soluções contendo 0, 100, 200, 300, 400 e 800 mg L⁻¹ de Arbolina®, avaliando-se as massas fresca de raiz e parte aérea (MFR e MFA), massa seca de raiz e parte aérea (MSR e MSPA), altura da parte aérea (AE), número de folhas (NF) e índice de área foliar (IAF) do feijoeiro. Com base nas respostas observadas, determinou-se a concentração de 217,92 mg L⁻¹ como a mais promissora em estimular o desenvolvimento vegetal. Um segundo ensaio foi conduzido em condições de campo empregando-se a concentração modelada no ensaio inicial e sem o uso de Arbolina® e as lâminas de irrigação correspondentes a 70, 80, 90 e 100% da evapotranspiração da cultura (ETc), seguindo um esquema fatorial 2x4, avaliando-se parâmetros biométricos (MSR e MST), assimilação líquida de CO₂ (A), condutância estomática (gs), concentração interna de CO₂ (Ci), transpiração (E), eficiência de uso da água (EUA) e índice SPAD, enzimas associadas ao estresse oxidativo (superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX), produtividade e qualidade dos grãos (Produtividade de grãos (PG), peso de cem grãos (P100), umidade, cinzas, lipídios, proteínas e carboidratos). Os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk e análise de variância para aqueles com distribuição normal. Dados com significância foram submetidos ao teste de Tukey (5%) e regressões quadráticas. Para gs e PG,

não houve normalidade nos resultados e houve diferenças em MSR, MST, enzimas SOD, APX e CAT, E e SPAD associadas às lâminas de irrigação. A aplicação de Arbolina[®] resultou em diferença para EUA e enzimas CAT e SOD. Na interação entre os fatores (lâminas de irrigação e aplicação da Arbolina[®]), observou-se efeito em P100 e enzimas CAT e APX. Em conformidade aos resultados significativos entre a aplicação das diferentes lâminas, houve maior produção de MSR e MST aplicando-se lâmina de 100% da ETc; menor atividade enzimática SOD foi verificada com a lâmina estimada de 81,44% da ETc e a maior atividade da enzima APX foi observada com a lâmina estimada de 86,15% da ETc. A obtenção dos maiores valores para E e P100 foram pela aplicação da lâmina, respectivamente, de 90 e 100% da ETc e o menor valor do índice SPAD foi observado pela aplicação da lâmina de 70% ETc. A aplicação de Arbolina[®] aumentou a EUA e P100 em 10 e 5%, respectivamente, mas reduziu a atividade enzimática CAT e SOD em 30 e 43%, respectivamente. A aplicação da Arbolina[®] aumentou a EUA, P100 e gerou efeito modulador sobre a atividade antioxidante das plantas, assim como as plantas que recebem 90 e 100% ETc produziram maiores taxas de MSR, MST, E e índice SPAD.

Palavras-chave: Bioestimulante vegetal, *Carbon Dots*, nanomaterial, estresse hídrico.

ABSTRACT

In agriculture, fertilizers, pesticides, and irrigation systems have been frequently used with the aim of increasing crop yields. However, many issues associated with the exhaustion of mineral reserves, contamination of environmental compartments and farmers, and limitations on water access have driven research into new agricultural inputs. In this context, products based on Carbon Dots (CDs) (*e.g.*, Arbolina®) have gained prominence. The present study aimed to evaluate the effects of applying Arbolina® on biochemical, physiological, and morphological responses in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivar BRS Radiante, subjected to different irrigation levels. Initially, a concentration-response assay was conducted using solutions containing 0, 100, 200, 300, 400, and 800 mg L⁻¹ of Arbolina®, evaluating the fresh root and shoot mass (FRM and SFM), root and shoot dry mass (RDM and SDM), aboveground height (AH), number of leaves (NL), and leaf area index (LAI) of the common bean. Based on the observed responses, a concentration of 217.92 mg L⁻¹ was determined to be the most promising in stimulating plant development. A second field trial was conducted using the concentration modeled in the initial assay and without the use of Arbolina® and the irrigation levels corresponding to 70, 80, 90, and 100% of the crop evapotranspiration (ET_c), following a 2x4 factorial design, evaluating biometric parameters (RDM and TDM), net CO₂ assimilation (A), stomatal conductance (g_s), internal CO₂ concentration (C_i), transpiration (E), water use efficiency (WUE), SPAD index, enzymes associated with oxidative stress (superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), and ascorbate peroxidase (APX)), grain productivity and quality (Y, P100, moisture, ash, lipids, proteins, and carbohydrates content). The data were subjected to the Shapiro-Wilk normality test and analysis of variance for those with a normal distribution. Significant data were subjected to Tukey's test (5%) and quadratic regressions. For g_s and Y, there was no normality in the results, and there were differences in RDM, TDM, SOD, APX, and CAT enzymes, E, and SPAD index associated with the irrigation levels. The

application of Arbolina® resulted in differences in WUE and CAT and SOD enzymes. In the interaction between factors (irrigation levels and Arbolina® application), effects were observed on P100 and CAT and APX enzymes. In accordance with the significant results among the application of different irrigation levels, higher production of RDM and SDM was achieved with the 100% ETc level; lower SOD enzyme activity was observed with the estimated 81.44% ETc level, and the highest APX enzyme activity was observed with the estimated 86.15% ETc level. The highest values for E and P100 were obtained by applying 90 and 100% ETc, respectively, and the lowest SPAD index was observed with the 70% ETc level. The application of Arbolina® increased WUE and P100 by 10 and 5%, respectively, but reduced CAT and SOD enzyme activity by 30 and 43%, respectively. The application of Arbolina® increased WUE, P100, and had a modulatory effect on the antioxidant activity of the plants, while plants receiving 90 and 100% ETc produced higher rates of RDM, SDM, E, and SPAD index.

Key words: Plant biostimulant, *Carbon Dots*, nanoparticle, water stress.

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1. Características físicas e químicas da Arbolina® | 24 |
| Quadro 2. Caracterização climática da Estação Experimental de Biologia da Universidade de Brasília (Brasília – DF) durante a condução do experimento do feijoeiro..... | 27 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Localização do experimento na Estação Experimental de Biologia, Universidade de Brasília, Brasília – DF..... | 26 |
| Figura 2. Distribuição dos tratamentos na área experimental. "COM ARB.®" e "SEM ARB.®" representam, respectivamente, as plantas que receberam ou não Arbolina® | 28 |
| Figura 3. Feijão-comum variedade BRS Radiante cultivado na área experimental da Estação Experimental de Biologia (UnB) em Brasília – DF (A, B); Coleta de dados com o IRGA (C, D); Coleta de dados do índice SPAD (E)..... | 35 |
| Figura 4. Matéria seca de raiz (A) e matéria seca total (B) em função da aplicação de diferentes lâminas de irrigação (70, 80, 90 e 100% ETc) em feijoeiro. | 40 |
| Figura 5. Atividade enzimática catalase (CAT) em função da aplicação de Arbolina® no feijoeiro. | 45 |
| Figura 6. Atividade enzimática catalase (CAT) em função da aplicação de diferentes lâminas de irrigação (70, 80, 90 e 100% ETc) no feijoeiro..... | 46 |
| Figura 7. Relação entre a atividade enzimática APX e lâminas de irrigação (70, 80, 90, 100% ETc)..... | 49 |
| Figura 8. Atividade enzimática catalase (APX) em função da aplicação de Arbolina® no feijoeiro. | 50 |
| Figura 9. Atividade enzimática catalase (APX) em função da aplicação de diferentes lâminas de irrigação (70, 80, 90 e 100% ETc) no feijoeiro..... | 51 |

| | |
|--|----|
| Figura 10. Fotossíntese líquida (A), condutância estomática (B), concentração interna de CO ₂ (C), transpiração (D) e índice SPAD (E) em plantas de feijoeiro submetidas a diferentes lâminas de irrigação (70, 80, 90 e 100% ETc) em feijoeiro..... | 54 |
| Figura 11. Eficiência de uso de água em função da aplicação de Arbolina® em feijoeiro, aos 40 dias após plantio..... | 57 |
| Figura 12. Produtividade de grãos em feijoeiro em função da aplicação de diferentes lâminas de irrigação (70, 80, 90 e 100% da ETc). | 59 |
| Figura 13. Produtividade em função da aplicação de Arbolina no feijoeiro. | 60 |
| Figura 14. Peso de cem grãos em função da aplicação de Arbolina® no feijoeiro. | 60 |
| Figura 15. Peso de cem grãos em função da aplicação de diferentes lâminas de irrigação (70, 80, 90 e 100% ETc) no feijoeiro. | 62 |
| Figura 16. Umidade de grãos de feijão cultivado sob diferentes lâminas de irrigação (70, 80, 90 e 100% da ETc)..... | 63 |
| Figura 17. Teor de cinzas (A), lipídios (B), proteínas (C) e carboidratos (D) em função da aplicação de diferentes lâminas de irrigação (70, 80, 90 e 100% ETc) em feijoeiro..... | 65 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Caracterização química do solo da área experimental. Brasília - DF, 2023..... | 28 |
| Tabela 2. Lâminas de irrigação aplicada aos tratamentos de irrigação baseada na porcentagem da evapotranspiração da cultura (ETc)..... | 31 |
| Tabela 3. Modelo de concentração-resposta obtido a partir da aplicação de Arbolina® em feijoeiro, coeficiente de correlação (R ²) e ponto de inflexão (dose mais benéfica) para massa fresca de raiz (MFR), índice de área foliar (IAF), número de folhas (NF)..... | 39 |

LISTA DE ANEXOS

| | |
|--|----|
| Anexo 1. Solução estoque A+B (solução N4: 85% NO ₃ +15%NH ₄) aplicada no feijoeiro em 27/06/2023. | 92 |
| Anexo 2. Análise de variância (ANOVA) para matéria seca de raiz (MSR) e matéria seca total (MST)..... | 92 |
| Anexo 3. Teste Tukey do fator diferentes lâminas de irrigação para matéria seca de raiz (MSR). | 92 |
| Anexo 4. Teste Tukey do fator diferentes lâminas de irrigação para matéria seca total (MST). | 93 |
| Anexo 5. ANOVA para taxa líquida de fotossíntese (A) em feijoeiro aos 40 DAP em Brasília, DF..... | 93 |
| Anexo 6. ANOVA para condutância estomática (gs) em feijoeiro aos 40 DAP em Brasília, DF. | 93 |
| Anexo 7. Teste não paramétrico Kruskal-Wallis para gs. | 94 |
| Anexo 8. ANOVA para concentração interna de CO ₂ (Ci) em feijoeiro aos 40 DAP em Brasília, DF..... | 94 |
| Anexo 9. ANOVA para transpiração (E) em feijoeiro aos 40 DAP em Brasília, DF. | 94 |
| Anexo 10. Teste Tukey do fator diferentes lâminas de irrigação para transpiração (E). | 94 |
| Anexo 11. ANOVA para índice SPAD em feijoeiro aos 40 DAP em Brasília, DF. | 95 |
| Anexo 12. Teste Tukey do fator diferentes lâminas de irrigação para índice SPAD. | 95 |
| Anexo 13. ANOVA para eficiência do uso da água (EUA) em feijoeiro aos 40 DAP em Brasília, DF..... | 95 |
| Anexo 14. ANOVA para atividade da enzima superóxido desmutase (SOD). | 95 |
| Anexo 15. Teste Tukey do fator diferentes lâminas de irrigação para atividade da enzima superóxido desmutase (SOD). | 96 |

| | |
|--|-----|
| Anexo 16. Regressão quadrática para lâminas de irrigação em função da atividade da enzima superóxido desmutase (SOD). Dados transformados por raiz de X. | 96 |
| Anexo 17. ANOVA para atividade da enzima catalase (CAT). | 96 |
| Anexo 18. Teste Tukey do fator diferentes lâminas de irrigação para atividade da enzima catalase (CAT). | 97 |
| Anexo 19. ANOVA para atividade da enzima peroxidase (APX). | 97 |
| Anexo 20. Teste Tukey do fator diferentes lâminas de irrigação para atividade da enzima peroxidase (APX)..... | 97 |
| Anexo 21. Regressão quadrática para lâminas de irrigação em função da enzima peroxidase (APX)..... | 97 |
| Anexo 22. Teste de normalidade W de Shapiro-Wilk e seu valor de significância para produtividade. | 98 |
| Anexo 23. ANOVA para peso de cem grãos. | 98 |
| Anexo 24. Teste Tukey do fator diferentes lâminas de irrigação para peso de cem grãos. | 98 |
| Anexo 25. ANOVA para umidade..... | 99 |
| Anexo 26. Teste Tukey do fator diferentes lâminas de irrigação para umidade. | 99 |
| Anexo 27. Regressão quadrática para lâminas de irrigação em função da umidade..... | 99 |
| Anexo 28. ANOVA para teor de cinzas. | 99 |
| Anexo 29. ANOVA para teor de lipídios. | 100 |
| Anexo 30. ANOVA para teor de proteínas..... | 100 |
| Anexo 31. ANOVA para teor de carboidratos..... | 100 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

A - Assimilação líquida de CO₂

APX - Ascorbato peroxidase

CAT - Catalase

CC - Capacidade de campo

CCI - Índice de conteúdo de clorofila

CDs - *Carbon Dots*

Ci - Concentração interna de CO₂

Cv. - Cultivar

Cvs. - Cultivares

DAA - Dias após aplicação

DAP - Dias após o plantio

dS - Decisiemens por metro

E - Taxa de transpiração

EDTA - Etilenodiaminotetracético

EROs - Espécies reativas de oxigênio

ETc - Evapotranspiração total da cultura

ETo - Evapotranspiração de referência

EUA - Eficiência do uso da água

gs - Condutância estomática

IRGA - Analisador portátil de fotossíntese por radiação vermelha

Kc - Coeficiente de cultivo

PG - Produtividade de grãos

PMSF - Fenilmetilsulfonil

PVPP - Polivinilpolipirrolidona

P100 - Peso de cem grãos

POD - Peroxidase

SOD - Superóxido dismutase

t - Toneladas

Var. - Variedade

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 13 |
| 2. HIPÓTESE..... | 15 |
| 3. OBJETIVOS | 15 |
| 3.1 Objetivo geral | 15 |
| 3.2 Objetivos específicos | 15 |
| 4. REVISÃO DE LITERATURA | 16 |
| 4.1 Importância socioeconômica do feijoeiro | 16 |
| 4.2 Clima na região de realização do experimento e condições ambientais para o cultivo do feijoeiro | 16 |
| 4.3 Estresse hídrico e adaptação das plantas à seca em feijoeiro | 17 |
| 4.4 Espécies reativas de oxigênio (EROs)..... | 19 |
| 4.5 Bioestimulantes vegetais para adaptação do feijoeiro à escassez hídrica | 21 |
| 5. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 24 |
| 5.1 Obtenção da Arbolina® | 24 |
| 5.2 Ensaio para determinação da concentração-resposta de Arbolina® | 25 |
| 5.3 Local e condução do experimento de campo | 26 |
| 5.4 Caracterização climática..... | 26 |
| 5.5 Material vegetal | 27 |
| 5.6 Delimitação experimental..... | 27 |
| 5.6.1 Adubações e tratamentos culturais | 28 |
| 5.7 Sistema e manejo da irrigação | 29 |
| 5.8 Aplicação da Arbolina® | 31 |
| 5.9 Enzimas associadas ao estresse oxidativo | 32 |
| 5.9.1 Obtenção dos extratos enzimáticos brutos..... | 32 |
| 5.9.2 Superóxido dismutase (SOD) (EC 1.15.1.1)..... | 32 |
| 5.9.3 Catalase (CAT) (EC 1.11.1.6) | 33 |

| | |
|---|-----------|
| 5.9.4 Ascorbato peroxidase (APX) (EC 1.11.1.11) | 34 |
| 5.10 Trocas gasosas | 34 |
| 5.11 Produtividade e peso de cem grãos | 35 |
| 5.11.1 Produtividade | 35 |
| 5.12 Indicadores de qualidade dos grãos (composição centesimal) | 36 |
| 5.12.1 Umidade | 36 |
| 5.12.2 Teor de cinzas | 36 |
| 5.12.3 Teor de lipídios | 37 |
| 5.12.4 Teor de proteínas | 37 |
| 5.12.5 Teor de carboidratos | 38 |
| 5.13 Análise estatística dos dados | 38 |
| 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 39 |
| 6.1 Concentração-resposta da Arbolina® | 39 |
| 6.2 Avaliações biométricas | 40 |
| 6.3 Enzimas associadas ao estresse oxidativo | 42 |
| 6.3.1 Superóxido dismutase (SOD) | 42 |
| 6.3.2 Atividade enzimática catalase (CAT) | 44 |
| 6.3.3 Peroxidase | 48 |
| 6.4 Trocas gasosas e eficiência do uso de água..... | 52 |
| 6.5 Produtividade e qualidade dos grãos | 58 |
| 7. CONCLUSÕES | 66 |
| 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 66 |
| 9. ANEXOS | 92 |

1. INTRODUÇÃO

A agricultura representa um elo fundamental entre a sociedade e o meio ambiente, sendo a terra um fator básico para a produção de alimentos. Preocupações diante de questões ambientais, aumento populacional e consumo mundial de alimentos, têm sido cada vez mais pautadas nas discussões relacionadas ao futuro da humanidade. Historicamente, a expansão agrícola originou incorporações de novas áreas de terra. Contudo, diante das atuais mudanças climáticas e das transformações de ecossistemas naturais em agroecossistemas, percebem-se os problemas associados a essa expansão, com a impossibilidade do crescimento de novas áreas cultiváveis em muitas regiões do mundo, dependendo somente do aumento de produtividade para suprir a crescente demanda por alimentos (Saath; Fachinello, 2018).

Até o ano de 2032, espera-se que o aumento das necessidades nutricionais seja o principal motivo para a crescente demanda por produtos agrícolas (OECD-FAO, 2023). Na agricultura, o uso intensivo de fertilizantes, pesticidas e sistemas de irrigação têm sido utilizados na perspectiva de se aumentar o rendimento de cultivos. Contudo, diversas inovações tecnológicas surgiram nos últimos anos a fim de aumentar a sustentabilidade na agricultura, dentre elas os bioestimulantes vegetais (Rouphael; Colla, 2020).

Os bioestimulantes vegetais são compostos capazes de regular e auxiliar os processos fisiológicos em diferentes cultivos (Caradonia *et al.*, 2019), aumentar a eficiência nutricional e a tolerância a estresses bióticos e abióticos das plantas, independente do seu teor de nutrientes (Du Jardin, 2015). Por mais de diferentes mecanismos não completamente compreendidos, essas substâncias podem influenciar positivamente na nutrição e crescimento das plantas, além de atenuarem estresses promovidos por temperatura, presença de elementos tóxicos, salinidade, entre outros (Bertrand; Gonzalez-Coloma; Prigent-Combaret, 2021).

Embora um sistema de categorias de bioestimulantes não esteja disponível de forma inequívoca, alguns compostos com dimensões em escala *nano* podem atuar como

bioestimulantes do crescimento de plantas e, numa perspectiva de sustentabilidade, espera-se que eles sejam produzidos empregando-se materiais de origem natural e renováveis. Nesse sentido, nanopartículas obtidas empregando-se fontes de carbono, tais como os *Carbon Dots* (CDs), tem se destacado. Trata-se de materiais com dimensões usualmente inferiores a 10 nanômetros e com superfície funcionalizada, que não possuem componentes potencialmente tóxicos em sua estrutura (Goryacheva; Sapelkin; Sukhorukov, 2017).

Aplicações de concentrações adequadas de CDs podem promover o crescimento vegetal por meio do aumento das taxas de fotossíntese e da assimilação de nutrientes, com reflexos sobre a produtividade e a qualidade dos produtos obtidos da agricultura (Li *et al.*, 2020).

A Universidade de Brasília, em parceria com a Embrapa Hortaliças, desenvolveu um produto à base de CDs denominado Arbolina[®], produto obtido a partir de matéria-prima renovável, pelo qual seu princípio ativo promoveu efeitos expressivos, mas ainda pouco compreendidos, em cultivos como morango e alface (Butruille, 2021; Lemos, 2021; Rodrigues, 2023). Em testes realizados no feijoeiro, a aplicação de Arbolina[®] também gerou resultados exploratórios significativos no aumento da eficiência hídrica e produtividade (Costa, 2021).

As mudanças climáticas observadas nos últimos anos podem resultar em alterações nos regimes hídricos e, com isso, afetar negativamente produtividade na agricultura. Aprimorar o já eficiente sistema de uso de água pelas plantas pode ser uma estratégia para o enfrentamento dessas mudanças e, assim, ferramentas tecnológicas como os CDs despertam como uma aposta promissora.

Juntamente com os benefícios agrícolas, é necessário compreender de forma mais detalhada os eventos responsáveis da ação dos CDs nas plantas, principalmente em cultivos importantes para a nutrição humana, como é o caso do feijoeiro.

2. HIPÓTESE

A aplicação de uma concentração adequada de Arbolina® pode auxiliará nas respostas bioquímicas, fisiológicas e morfológicas em plantas de feijoeiro submetido a diferentes lâminas de irrigação, regulando a atividade de enzimas associadas ao estresse oxidativo, com efeitos positivos sobre a eficiência de uso de água, taxa fotossintética, produtividade e qualidade dos grãos.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Avaliar os efeitos da aplicação de Arbolina® sobre nas respostas bioquímicas, fisiológicas e morfológicas em feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivar BRS Radiante, submetido a diferentes lâminas de irrigação.

3.2 Objetivos específicos

i) Realizar testes em plantas de feijão a partir de aplicações de diferentes concentrações de Arbolina®, objetivando a determinação de uma possível concentração mais eficiente em estimular crescimento vegetativo inicial;

ii) Determinar os efeitos da adição da concentração mais eficiente de Arbolina® sobre alterações nas atividades das enzimas ascorbato peroxidase, superóxido dismutase e catalase nas plantas cultivadas com diferentes lâminas de irrigação;

iii) Determinar os efeitos da possível concentração mais eficiente da Arbolina® sobre possíveis alterações nos parâmetros associados às trocas gasosas das plantas, taxa de fotossíntese, produtividade e qualidade dos grãos nas plantas cultivadas com diferentes lâminas de irrigação.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Importância socioeconômica do feijoeiro

O feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é originário da América do Sul e pertence à família *Fabaceae*, sendo uma planta herbácea anual que pode ser trepadeira ou não e é amplamente cultivado nas Américas, com grande diversidade genética e adaptação a diferentes condições ambientais (Broughton *et al.*, 2003). Esta espécie é uma importante fonte nutricional e energética, especialmente para a população de menor poder aquisitivo, sendo uma das fontes de proteínas de menor custo para a população brasileira (Celmeli *et al.*, 2018; Bettioli *et al.*, 2020). O grão do feijoeiro apresenta teores de aminoácidos essenciais adequados para suprimento das necessidades nutricionais diárias de um adulto e representa uma fonte de proteína de menor custo comparada à proteína de origem animal (Ribeiro *et al.*, 2007; Marquezi *et al.*, 2016).

O Brasil se apresenta em posição destacada na produção mundial de feijão, ocupando a segunda posição (2,8 milhões de toneladas, anualmente), sendo superado apenas pela Índia (6,5 milhões de toneladas, anualmente) (FAOSTAT, 2024). Na safra agrícola 2022/23, a cultura do feijão ocupou aproximadamente 2,7 milhões de ha no Brasil, conferindo produtividade média de pouco mais de 1000 kg ha⁻¹ (CONAB, 2023).

A grande variabilidade morfológica nas diferentes linhagens de feijoeiro favorece o melhoramento genético da espécie e, conseqüentemente, a obtenção de novas cultivares adaptadas aos diversos sistemas de produção prevalentes no Brasil (Kappes *et al.*, 2008).

4.2 Clima na região de realização do experimento e condições ambientais para o cultivo do feijoeiro

Na região Centro-Oeste brasileira, o clima é caracterizado por verões chuvosos e invernos secos, considerando a origem deste último pela estabilidade gerada através da

influência do anticiclone subtropical do Atlântico Sul e de pequenas dorsais que se formam sobre a parte continental Sul-Americana (Nimer, 1989). O período de chuva ocorre pelo maior deslocamento para o Hemisfério Sul da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), responsável por gerar instabilidade no verão, com temperaturas elevadas durante todo o ano em função da influência da massa de ar tropical marítima e equatorial. No inverno, observa-se baixa índice de precipitação devido ao deslocamento da ZCIT para o Hemisfério Norte (Cardoso *et al.*, 2014). O regime de precipitação na região Centro-Oeste é caracteristicamente tropical, com máxima no verão e mínima no inverno e, especificamente no Distrito Federal, a média anual de precipitação é de 1.470 mm (± 182) (Lima; Aparecido, 2020).

Os principais fatores climáticos que afetam a produtividade do feijoeiro são as temperaturas máximas e mínimas, o estresse hídrico e a baixa umidade relativa do ar, responsáveis por ocasionarem principalmente a queda de flores e o atraso no desenvolvimento de vagens (Faria, 2012). O fator hídrico limitante na produção do feijoeiro relaciona-se principalmente a três fases importantes: germinação, florescimento e enchimento de grãos (Soratto *et al.*, 2003).

A produtividade do feijoeiro aumenta com a quantidade de água disponível no solo até determinado limite e vários fatores interferem nesse processo, principalmente, a cultivar utilizada, a época de plantio, além dos manejos do solo e da cultura adotados.

4.3 Estresse hídrico e adaptação das plantas à seca em feijoeiro

Um dos fatores de maior influência na produtividade vegetal na cultura do feijoeiro é a disponibilidade hídrica e isso ocorre devido à sensibilidade da planta à deficiência e excedente de água no solo, por exemplo, na fase de florescimento, com a escassez de água impedindo o florescimento de algumas plantas ou resultando em abortamento de flores (Campos *et al.*, 2021). A água é um componente fundamental para a manutenção da transpiração e condutância

estomática e é indispensável para a entrada de gás carbônico no mesófilo foliar, interferindo diretamente nos parâmetros fotossintéticos (Oliveira *et al.*, 2002). De forma semelhante a outros cultivos, todavia, a produtividade do feijoeiro é afetada pelas condições hídricas do solo. A deficiência ou excesso de água podem reduzir a produtividade, sendo o feijoeiro altamente sensível à falta de água, especialmente nos períodos de floração, início da formação de vagens e enchimento de grãos (Oliveira *et al.*, 2018).

O déficit hídrico ocorre quando não há quantidade suficiente de água no solo para suprir a demanda da planta, ocorrendo a limitação de seu crescimento e desenvolvimento vegetal pela redução na absorção de água e nutrientes, principalmente por meio do fechamento de estômatos, redução da transpiração e murchamento das folhas e, em condições extremas de carência de água no solo, é possível que ocorra a morte da planta (Marenco; Lopes, 2005).

A característica de sazonalidade do feijoeiro faz com que a cultura seja propensa para uma grande amplitude climática e, assim, deve possuir adaptabilidade diante do meio, considerando alguns fatores que possivelmente afetam de forma drástica seu desenvolvimento e produção, como por exemplo chuva, temperatura do ar e radiação solar (Silva, 2018). Compreende-se por adaptação a possível harmonia entre o meio e o organismo, de forma que as plantas que estejam naturalmente expostas às condições ambientais apresentem todas as características funcionais e estruturais capazes de se ajustar às mudanças ambientais (Rizzini, 1997). Nessas condições, as plantas podem apresentar determinados tipos de mecanismos para tal processo, a fim de se tornarem resistentes à seca, por exemplo, classificando-se em retardo, tolerância e escape (Kerbaui, 2004).

As plantas tornam-se adaptáveis à seca a partir da manutenção de sua turgência através do ajustamento osmótico, que deve ser suficiente para manter o abastecimento de água para suas folhas mesmo em déficit hídrico. Neste caso, as folhas passam pelo processo de senescência e caem após atingirem a maturidade (Verslues *et al.*, 2006). O efeito do déficit

hídrico em plantas cultivadas afeta vários aspectos de forma complexa, desde seu crescimento, dependendo da duração e gravidade deste dano, incluindo mudanças anatômicas, morfológicas, fisiológicas e bioquímicas até seu estágio final de desenvolvimento (Brito *et al.*, 2020).

Para sobreviverem ao estresse por deficiência hídrica, as plantas aprimoraram, ao longo de sua evolução, estratégias fisiológicas e morfológicas para reduzir os impactos negativos e são exemplos disto a diminuição do tamanho das folhas, objetivando a diminuição da perda de água; a cobertura das folhas com cêra cuticular (servindo para preservar água em seu interior); a presença de pêlos finos e de menor espessura que atuam na retenção da umidade na superfície foliar e, no sistema radicular, ocorre a presença de raízes maiores e ramificadas para facilitar a busca por água no solo (Ghannoum *et al.*, 2003).

4.4 Espécies reativas de oxigênio (EROs)

As espécies reativas do oxigênio (EROs) são moléculas instáveis e extremamente reativas capazes de transformar outras moléculas com as quais colidem. Constantemente, as plantas são expostas a perturbações ambientais tanto de natureza abiótica quanto biótica, comprometendo sua sobrevivência (Hossain *et al.*, 2018). Essas perturbações são capazes de influenciar de forma negativa o crescimento e desenvolvimento de espécies vegetais (Dresselhaus; Hückelhoven, 2018). Todavia, determinadas substâncias, tais como as espécies reativas de oxigênio (EROs), possuem papel destacado na defesa das plantas contra essas perturbações. As EROs são substâncias formadas a partir da excitação do O_2 para a forma de singleto (O_2^1), que podem ser originadas da transferência de 1, 2 ou 3 elétrons para o O_2 , formando 3 espécies de radicais livres como radical superóxido (O_2^-), peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e o radical hidroxila (HO^-) (Mittler, 2002). Virtualmente, todos estresses bióticos e abióticos promovem a geração de EROs. Em condições normais de crescimento, a produção dessas espécies é baixa ($240 \mu M s^{-1} O_2^-$ e $0,5 \mu M H_2O_2$ nos cloroplastos), mas condições de

estresse, que incluem seca, salinidade e altas concentração de CO₂, metais pesados e deficiência nutricional, podem perturbar a homeostase celular, aumentando significativamente a produção de EROs (240–720 μM s⁻¹ O₂⁻ e de 5–15 μM H₂O₂) (Mittler, 2002).

A resposta celular contra o estresse oxidativo é crítica para o crescimento e adaptação das plantas (Considine; Foyer, 2021) e o estresse geralmente ocorre quando o equilíbrio entre a produção de EROs e a atividade de sua extinção é perturbado. Se o nível de estresse atingir determinado limite, o acúmulo de EROs desencadeará uma resposta genética, incluindo vias programadas de apoptose que é uma forma de morte celular programada ou “suicídio” celular (Foyer; Noctor 2005). A produção de EROs induzida pelo estresse faz parte de um sistema de resposta de redução/oxidação (redox) em múltiplas camadas, no qual a detecção e a adaptação ao estresse são sincronizadas com o metabolismo da planta e as vias dos fitohormônios (Considine; Foyer 2021).

Os processos celulares oxidativos induzidos pela produção de EROs e que resultam em danos às células são a oxidação de proteínas, inibição enzimática, danos ao DNA e RNA e a peroxidação de lipídeos em níveis de membrana plasmática (Breusegem *et al.*, 2001). Todavia, as plantas desenvolveram mecanismos de desintoxicação de EROs visando a retirada de radicais livres em excesso, evitando ou diminuindo os danos oxidativos, com os principais exemplos representados pelo aumento da produção de enzimas como a catalase (CAT), superóxido dismutase (SOD) e ascorbato peroxidase (APX) (Mittler, 2002; Gill; Tuteja, 2010; Dias *et al.*, 2014).

Em resposta ao estresse, portanto, a planta produz uma maior quantidade de EROs e, como forma de defesa, são produzidos metabólicos enzimáticos que tentam suprimir ou reduzir os efeitos das EROs através dessas enzimas (Barbosa *et al.*, 2014). A produção de CAT, SOD e APX associa-se com a manutenção dos níveis de peroxidação lipídica e sua ativação é

realizada a partir da sinalização de déficit hídrico, por exemplo, como forma de proteção do estresse oxidativo (Araújo *et al.*, 2021).

Nesse sentido, são elucidativos os resultados publicados por Araújo *et al.* (2021) que avaliaram a atividade da CT, SOD e APX em cultivares de feijão preto, BRS Esteio e IPR Tuiuiú submetidas ao déficit hídrico. Os autores observaram que a restrição hídrica afetou de forma distinta a atividade das enzimas, conforme o potencial osmótico, assim como o conteúdo de prolina, que pode atuar como antioxidante de alta potência, inibindo a peroxidação lipídica (Gill; Tuteja, 2010; Araújo *et al.*, 2021).

4.5 Bioestimulantes vegetais para adaptação do feijoeiro à escassez hídrica

O cultivo do feijoeiro tem se ampliado para várias regiões com distribuição pluvial irregular, devido à adoção de várias tecnologias de irrigação (Melo; Silva; Esperancini, 2016). Contudo, essa irregularidade não é o único fator que pode gerar déficit hídrico, estando associado também a questões relacionadas à ocorrência de elevadas temperaturas e intensidade luminosa, que podem provocar alto processo evaporativo e dessecação do solo (Trovão *et al.*, 2007).

A escassez hídrica acarreta problemas no crescimento e no desenvolvimento do feijoeiro, potencialmente afetando a produtividade (Araújo, 2017). A aplicação de substâncias capazes de atenuar os efeitos negativos da escassez hídrica tem sido apresentada como alternativa promissora na atenuação dos efeitos negativos observados (Neto *et al.*, 2020). Nesse sentido, o uso de bioestimulantes vegetais apresenta papel destacado (Galvão *et al.*, 2019).

Os bioestimulantes vegetais visam estimular o crescimento da planta de modo que os efeitos do estresse hídrico sejam minimizados, promovendo a resiliência de determinado sistema de cultivo em condições limitantes de água (Antonucci *et al.*, 2023). Bioestimulantes vegetais são substâncias ou microorganismos aplicados às plantas com o objetivo de aumentar

a eficiência nutricional e a tolerância a estresses bióticos e abióticos, além de melhorar a produtividade e a qualidade dos produtos obtidos, independentemente do seu teor de nutrientes (Du Jardin, 2015). Eles são capazes de induzir a absorção de nutrientes pelas plantas a partir do estímulo de enzimas específicas (*e. g.*, H⁺-ATPase) ou pela maior liberação de ácidos orgânicos e outros compostos sinalizadores, modelando a população microbiana benéfica no ambiente radicular, resultando em maior absorção de nutrientes (Kumar; Kumar, 2021).

O Programa Nacional de Bioinsumos, criado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) tem por objetivo ampliar e fortalecer a utilização de bioinsumos para promoção do desenvolvimento sustentável da agropecuária brasileira (Brasil, 2020a). O foco desse programa baseia-se na proposta de aproveitamento do potencial da biodiversidade existente no país para reduzir a dependência externa de insumos. O programa foi instituído pelo decreto nº 10.375, pelas portarias nº 102 (26 de maio de 2020) e nº 103 (26 de maio de 2020), e surgiu a partir da necessidade do setor produtivo (agrícola, aquícola, florestal e pecuária) de se alinhar com práticas inovadoras (Brasil, 2020b). Não há, todavia, uma definição sobre o que são os bioestimulantes vegetais nessas legislações.

Resende (2022) avaliou a produtividade do feijoeiro com a cultivar BRS Estilo frente à aplicação foliar de bioestimulantes e reguladores de crescimento Tilt[®], Stimulate[®], Booster[®], extrato de algas marinhas (*Ascophyllum nodosum*), Bioenergy[®] e Fision[®], e observou aumento da produtividade na ordem de 11 e 10 sacas por ha com aplicação dos produtos Fision[®] e Booster[®], respectivamente. Já Reis (2021) avaliou a produtividade das cultivares de feijão IAC Imperador e IPR Camps Gerais em diferentes condições hídricas e aplicação do produto Stimulate[®] e observou ausência de efeito do produto na atenuação do déficit hídrico. Contudo, observou incremento de 24% no desenvolvimento vegetativo (matéria seca na fase vegetativa R6 e R8 e área foliar em R6) para a cultivar IPR Campos Gerais.

Dentre os bioestimulantes vegetais existem os *Carbon Dots*, que são considerados nanomateriais com escala nanométrica, apresentando ao menos uma de suas dimensões menor que 100 nanômetros. Diante dessa escala, os materiais possuem propriedades diferentes daqueles com dimensões maiores, apresentando novas e eficientes aplicações em diversas áreas (Seraglio; Gonçalves; Pereira, 2016).

Os CDs são nanomateriais de grande interesse para a pesquisa devido às suas propriedades únicas de fotoluminescência, baixa toxicidade e fotoestabilidade, possuindo nanoestruturas de dimensão menor que 10 nanômetros (Li *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2004). Acredita-se que esses nanomateriais possam desempenhar um papel fundamental para a solução de desafios existentes na agricultura, por exemplo, minimizando estresses ambientais. Nesse sentido, muitos materiais à base de CDs têm sido testados, com ênfase nas condições sanitárias das culturas, desenvolvimento vegetal, aumento da eficiência da utilização de fertilizantes e pesticidas (Giraldó *et al.*, 2019; Butruille, 2021; Lemos, 2021). Os CDs conferem também maior biocompatibilidade quando comparados a outros nanocompostos (*e.g.*, nanocompostos metálicos) devido à sua estrutura de carbono atóxica (Li *et al.*, 2020).

Recentemente, pesquisadores da Universidade de Brasília (UnB) e Embrapa Hortaliças desenvolveram um produto à base de CDs com o nome comercial de Arbolina[®], que tem apresentado resultados promissores em diferentes cultivos agrícolas. Pela nanotecnologia em sua composição, esse bioestimulante vegetal, registrado junto ao MAPA como fertilizante organo-mineral (nº BA001066-9.000001) possui características químicas que permitem uma absorção mais eficiente pelas folhas e no interior da planta, potencialmente ativando rotas metabólicas fundamentais para o desenvolvimento vegetal.

Dentre os trabalhos já realizados com o uso da Arbolina[®], cita-se a avaliação em morangueiro (*Fragaria x ananassa* Duch), que resultou em aumento de 41% na produtividade quando o produto foi aplicado no substrato à concentração de 155,6 mg L⁻¹ (Butruille, 2021).

Em alface *baby leaf* (*Lactuca sativa* L.), a Arbolina[®] estimulou a produção de folhas quando o produto foi aplicado na concentração de 800 mg L⁻¹ (Lemos, 2021). Em tomateiro (*Solanum lycopersicum* L.), observou-se aumento de 60% na taxa de fotossíntese e de 130% no lançamento de raízes, enquanto para cacau (*Theobroma cacao* L.), o crescimento de raízes laterais aumentou em 60% (D'Alessandro, 2019).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Obtenção da Arbolina[®]

Os CDs utilizados nesse experimento, produto comercial denominado Arbolina[®], foram sintetizados no Laboratório de Química Inorgânica e Materiais do Instituto de Química (IQ) da Universidade de Brasília (DF) e foram originados a partir de uma fonte de carbono submetida à síntese solvotérmica em autoclave revestida de Teflon, com posterior resfriamento até a temperatura ambiente. As dispersões de CDs foram filtradas, removendo-se o solvente, sendo o material posteriormente congelado e liofilizado. Algumas características físicas e químicas desse material estão sumarizadas no Quadro 1 (Butruille, 2021).

Quadro 1. Características físicas e químicas da Arbolina[®].

| | | | | |
|-----------------------------------|--------------|----------|----------|----------|
| Composição elementar | C: 61% | H: 6,3% | N: 21,3% | O: 11,4% |
| Teor de Carbono Orgânico Total | 67% | | | |
| Formato | Esferoidal | | | |
| Tamanho | 3,1 nm | | | |
| Composição da superfície | C: 67,4% | N: 11,6% | O: 21% | |
| Grupos superficiais predominantes | C=O | C=N | C=C | O—H |
| Região de emissão máxima de luz | 440 a 530 nm | | | |

5.2 Ensaio para determinação da concentração-resposta de Arbolina®

Sementes de feijão-comum cultivar BRS Radiante foram testadas quanto à sensibilidade ao crescimento inicial a partir da adição de soluções contendo concentrações crescentes de Arbolina®, visando determinar uma possível concentração adequada, capaz de estimular o crescimento inicial das plântulas.

Para isto, as sementes foram sanitizadas por imersão em solução de hipoclorito de sódio (10%) durante 20 minutos, lavadas abundantemente com água destilada e acondicionadas em papel de germinação autoclavado. As sementes foram acondicionadas em câmara de crescimento de plantas (12 h de luz e 12 h no escuro na temperatura de 28 ± 1 °C).

Após emergência, as plântulas foram transferidas para potes de plástico com capacidade para 0,60 L preenchidos com areia média esterilizada e umedecida, garantindo-se o crescimento das mesmas por meio da aplicação de solução nutritiva de Hoagland (Hoagland; Arnon, 1950) diluída a 25%. As aplicações da solução nutritiva ocorreram diariamente às 8, 13 e 18 h por 17 dias. As plantas também receberam duas aplicações contendo 0, 100, 200, 300, 400 e 800 mg L⁻¹ de Arbolina®, a primeira no estágio de desenvolvimento da cultura V1 e a última em V2.

Após 17 dias, as plantas foram coletadas e pesadas em balança analítica (0,00001 g) para determinação das matérias frescas das raízes (MFR) e da parte aérea (MFA). Imagem das plantas foram obtidas para determinação do índice de área foliar (IAF), empregando-se o programa de processamento de imagens (ImageJ®). As plantas foram então secas em estufa a 65 °C até a massa constante para a determinação da matéria seca das raízes (MSR) e da parte aérea (MSA) (Silva, 2009), em balança analítica (0,00001 g).

As variáveis foram submetidas à regressão, adotando-se aquelas com modelo polinomial de segunda ordem. Esse tipo de modelo tem sido empregado rotineiramente em trabalhos que visam selecionar concentrações específicas de produtos bioestimulantes na resposta da plantas. Para determinação da melhor concentração de Arbolina, determinaram-se os pontos de máxima

dos modelos com coeficiente de determinação (R^2) acima de 85% e a concentração considerada mais adequada foi obtida a partir da média desses pontos.

5.3 Local e condução do experimento de campo

O cultivo em campo (Figura 1) foi conduzido no período entre 04 de junho a 28 de agosto de 2023, na área experimental da Estação Experimental de Biologia, pertencente à Universidade de Brasília (UnB), em Brasília, DF, situada entre as coordenadas geográficas de 15°44'11" de latitude Sul e de 47°52'50" longitude Oeste, e a uma altitude de 1.004 metros.



Figura 1. Localização do experimento na Estação Experimental de Biologia, Universidade de Brasília, Brasília – DF.

5.4 Caracterização climática

De acordo com a classificação de Köppen-Geiger, a região onde está localizada a Estação Experimental de Biologia pertence ao tipo Aw', apresentando clima tropical com inverno seco, estação chuvosa no verão (novembro a abril) e estação seca no inverno (maio a outubro). A

média de temperatura do mês mais frio é superior a 18 °C e as precipitações são superiores a 750 mm anuais, atingindo 1.800 mm (Cardoso, Marcuzzo e Barros, 2014). A caracterização climática do local do experimento foi obtida a partir dos dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (Quadro 2).

Quadro 2. Caracterização climática da Estação Experimental de Biologia da Universidade de Brasília (Brasília - DF) durante a condução do experimento do feijoeiro em campo.

| Média | Temperatura (°C) | Umidade (%) | Vento (m s ⁻¹) | Radiação solar (MJ m ⁻² dia ⁻¹) | Precipitação (mm ciclo ⁻¹) |
|--------|---------------------|----------------|-------------------------------|---|---|
| Máxima | 32,3±4,4 | 94,0±18,0 | - | - | - |
| Média | 20,2±4,4 | 54,6±18,0 | 0,01±0,1 | 1,45±0,1 | 15,0* |
| Mínima | 9,4±4,4 | 16,0±17,4 | - | - | - |

*Somatória no período do experimento. Os dados foram obtidos junto à estação meteorológica mais próxima (Instituto Nacional de Meteorologia, código: A001).

5.5 Material vegetal

Utilizou-se a cultivar de feijão-comum (*Phaseolus Vulgaris* L.) “BRS Radiante”, originada do cruzamento biparental entre Pompadour e Iraí, realizado pela Embrapa Arroz e Feijão. Esse material apresenta bom potencial produtivo, grão grande, excelentes qualidades culinárias, porte ereto e resistência ao acamamento (Faria, 2002).

5.6 Delinamento experimental

Para a distribuição dos tratamentos, foi seguido um esquema (Figura 2) em parcelas subdivididas, em que na parcela utilizou-se a aplicação ou não de Arbolina®, e na subparcela as lâminas de irrigação de 70, 80, 90 ou 100% da evapotranspiração da cultura (ETc).

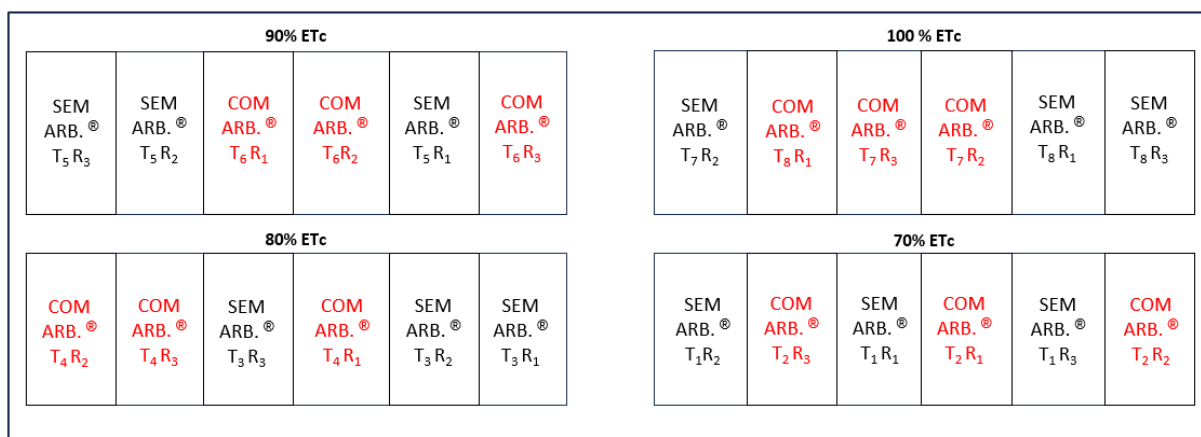


Figura 2. Distribuição dos tratamentos na área experimental. "COM ARB.®" e "SEM ARB.®" representam, respectivamente, as plantas que receberam ou não Arbolina®.

5.6.1 Adubações e tratamentos culturais

Anteriormente à sementeira, o solo da área foi amostrado e analisado quanto aos atributos de fertilidade (Silva, 2009) (Tabela 1) e, com base nas recomendações de correção do solo e adubação para o Cerrado (Sousa; Lobato, 2004), foi realizada a calagem aplicando-se calcário dolomítico do tipo filler (CaO 30%, MgO 18% e PRNT 100%) três meses antes do plantio, em quantidade suficiente para elevar a saturação por bases de 60%.

Tabela 1. Caracterização química do solo da área experimental. Brasília - DF, 2023.

| Característica | Unidade | Profundidade | Valor de Referência |
|-----------------------------|------------------------|--------------|---------------------------------|
| | | (cm) | |
| | | 0-20 | |
| pH H ₂ O (1:1) | | 5,4 | Acidez média (5,0 a 5,5) |
| P | mg dm ⁻³ | 10,7 | Adequado (8,1 a 12) |
| K ⁺ | | 0,12 | Alto (> 0,13) |
| Na ²⁺ | | 0,04 | Baixo (> 0,15) |
| Ca ²⁺ | | 1,7 | Baixo (> 2,0) |
| Mg ²⁺ | cmolc dm ⁻³ | 0,3 | Baixo (> 0,4) |
| Al ³⁺ | | 0,1 | Toxidez muito baixa (0,0 a 0,2) |
| Acidez (+Al ³⁺) | | 3,2 | Média toxidez (2,5 a 5,0) |
| CTC (pH _{7,0}) | | 5,4 | Baixa (< 7,2) |
| Saturação por alumínio | % | 4 | Adequada (< 15) |

| | | | |
|---------------------|------|------|-------------------|
| Saturação por bases | | 40 | Média (40,1 a 60) |
| Matéria orgânica | g/kg | 51,6 | Alto (> 45) |

A adubação pré-plantio foi realizada na área experimental de 404 m² em 02 de junho de 2023, empregando fosfato monoamônico 12-61-00 e nitrato de potássio 12-00-45, totalizando 0,7, 4,8 t ha⁻¹. No estágio vegetativo V4, realizou-se adubação nitrogenada e potássica em cobertura, adicionando-se os fertilizantes uréia e nitrato de potássio (0,22 e 0,04 t ha⁻¹). Ao longo do cultivo, duas aplicações com óleo de Neem foram realizadas por meio de pulverização foliar, juntamente com a aplicação de adubo foliar (Anexo 1). Foram aplicados, respectivamente, 20 g e 50 g em 15 L de MgSO₄ (P.A. heptahidratado) e CaCl₂ (USP dihidratado), via pulverização, no estágio R5, além do inseticida Bioinset 800 SC Fipronil/Imidacloprido e capinas manuais periódicas.

5.7 Sistema e manejo da irrigação

Utilizou-se o sistema de irrigação por gotejamento superficial, com emissores in lin, com vazão média de 1,74 L h⁻¹, na pressão de serviço de 150 kPa. As linhas laterais consistiram de mangueiras em polietileno de 16 mm, com emissores espaçados de 0,2 m e linhas espaçadas em 0,45 m, com um gotejador entre duas plantas de feijão. O sistema de irrigação possuía ainda um conjunto de motobomba de 3,5 CV; painel automático de controle (Galcon), filtro de disco de 130 microns, válvulas automáticas com solenoides de 1”, regulador de pressão de 150 kPa, tubulações de PVC azul de 50 mm na linha principal e de derivação.

Após a instalação do sistema de irrigação, foi realizado ensaio de uniformidade de distribuição de água (Bernardo *et al.*, 2019). Foram coletas a vazão de oito emissores na linha lateral e em quatro linhas laterais, obtendo-se coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) de 99,09%.

Até aos 15 dias após a semeadura (DAS) todos os tratamentos receberam a mesma

lâmina de irrigação (100% da ETc) para melhorar a germinação e o stande das plantas. Para estimar a Evapotranspiração de Referência (ETo) pela equação de Hargreaves e Samani (1985) foram utilizados dados da estação meteorológica mais próxima do local do experimento administrada pelo Instituto Nacional de Meteorologia, código A001.

Os valores do coeficiente de cultivo (Kc) do feijoeiro foram: 0,9 no início do desenvolvimento vegetativo; 1,51 nas fases de floração e formação de vagens; e 0,8 no final do ciclo da planta (Guerra *et al.*, 2003). Foram realizados testes de campo para determinar a faixa molhada, segundo recomendação descrita em Keller; Karmeli (1974). A porcentagem de molhamento foi definida como sendo igual a 1, para a condição de maior reposição da água.

A irrigação total necessária (ITN) foi calculada pela Equação 1, resultando em lâmina de irrigação total durante do ciclo do feijoeiro conforme Tabela 2.

$$ITN = ETc \times PAM / (EI) \quad (1)$$

Em que:

ETc: Evapotranspiração da cultura (mm dia⁻¹);

PAM: Percentagem de área molhada (Valor utilizado 1,0);

EI: Coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) x 0,9 (Vermeiren; Jobling (1997)

O tempo de irrigação (Ti) foi calculado a partir da Equação 2:

$$Ti = 60 (ITN \times Eg \times EI / qg) \quad (2)$$

Em que:

Ti = tempo de irrigação (minutos);

ITN: Irrigação total necessária (mm);

Eg: Espaçamento entre gotejadores (0,2 m);

El: Espaçamento entre linhas de gotejadores (0,45 m);

qg: Vazão do gotejador (1,74 L h⁻¹).

Tabela 2. Lâminas de irrigação aplicada para cada porcentagem da evapotranspiração da cultura (ETc).

| Porcentagem da ETc | Lâmina aplicada (mm) |
|--------------------|----------------------|
| 100% | 361,10 |
| 90% | 324,99 |
| 80% | 288,88 |
| 70% | 252,77 |

5.8 Aplicação da Arbolina®

A quantidade de Arbolina® (Figura 2) aplicada foi, conforme observado no ensaio inicial de concentração-resposta (217,92 mg L⁻¹) em todos os tratamentos. A primeira aplicação ocorreu na fase vegetativa V2, quando ocorreu o surgimento e o crescimento das folhas primárias, as quais estão totalmente expandidas e ficam na posição horizontal; e a segunda aplicação ocorreu na fase reprodutiva de pré-floração R5, onde os primeiros ramos secundários se desenvolvem e surgem os primeiros botões florais. Esses estádios foram escolhidos em função da planta estar ativamente envolvida no crescimento vegetativo e na formação e enchimento de grãos, respectivamente. A aplicação foi realizada por meio de pulverização diretamente nas folhas, empregando-se pulverizador costal (Kala) tipo compressão prévia, bico com jato regulável e reservatório de 5 L, onde foi pulverizado a uma altura de 0,40 m das plantas e velocidade de 1 m s⁻¹. Os tratamentos sem arbolina receberam pulverizações com água, veículo de solubilização da Arbolina®. O volume aproximado aplicado para cada planta foi de 12,5 mL.

5.9 Enzimas associadas ao estresse oxidativo

5.9.1 Obtenção dos extratos enzimáticos brutos

Em 25 de julho de 2023, amostras das folhas localizadas no terço superior das plantas foram coletadas para determinação das enzimas associadas ao estresse oxidativo. Para isto, as folhas foram coletadas cuidadosamente e envelopadas com papel alumínio, sendo acondicionadas em caixa de resfriamento contendo nitrogênio líquido (N₂). Após a coleta, o material foi imediatamente transportado para laboratório, onde ocorreu o maceramento das folhas em N₂, adicionando-se meio de homogeneização composto por tampão fosfato de potássio 0,1 mol L⁻¹ (pH 6,8), ácido etilenodiaminotetracético 0,1 mmol L⁻¹, fluoreto de fenilmetilsulfônico 1 mmol L⁻¹ e polivinilpolipirrolidona 1% (p/v) (Peixoto *et al.*, 1999). O material homogeneizado, após filtrado em quatro camadas de gaze, foi centrifugado a 12.000 g, por 15 minutos, a 4 °C. O sobrenadante obtido foi denominado extrato enzimático bruto.

5.9.2 Superóxido dismutase (SOD) (EC 1.15.1.1)

Para determinação da atividade da SOD, preparou-se um coquetel do meio de reação da enzima composto por tampão fosfato de sódio 100 mmol L⁻¹ (pH 7,5), metionina 50 mmol L⁻¹, riboflavina 0,1 mmol L⁻¹, EDTA 5 mmol L⁻¹ e NBT 1 mmol L⁻¹. A metionina e a riboflavina foram preparadas no escuro e mantidas em recipientes envolvidos em papel alumínio para evitar fotoxidação. Foram adicionados, em cada amostra, 1,5 mL de tampão fosfato de sódio, 780 µL de metionina, 60 µL de riboflavina, 60 µL de EDTA, 320 µL de água e 225 µL de NBT. Tubos foram identificados como “branco do claro” com 50 µL de água adicionado em cada e outros tubos identificados como “branco do escuro” com 50 µL adicionados da amostra preparada anteriormente e em demais tubos, todos em duplicata, foram adicionados 50 µL dessa mesma amostra preparada anteriormente. Os tubos do “branco do escuro” ficaram protegidos de

qualquer luz, envolvidos totalmente com papel alumínio, durante 10 minutos. Os tubos do “branco do claro” e os demais tubos contendo as amostras foram levados a uma câmara de fotorredução (uma caixa vedada contendo uma lâmpada) e permaneceram durante 10 minutos, com a reação resultante sendo identificada a partir da verificação dos tubos identificados como “branco do claro” apresentarem coloração azulada. Essa reação é responsável por indicar a máxima redução do composto NBT pela formação de um composto com essa coloração azul escuro chamado de formazan azul.

Posteriormente, todos os tubos foram levados para leitura espectrofotométrica a 560 nm. A partir dos dados de absorbância obtidos, a atividade da enzima foi dada em unidades de SOD, ou seja, a quantidade de enzima capaz de inibir em 50% a fotorredução do NBT (Bailly *et al*, 1996; Goel & Sheoran, 2003). O cálculo foi realizado por meio da Equação 3 e os resultados foram expressos em U mg⁻¹ de proteínas:

$$\text{SOD} = (A/(a - b)) - 1 \quad (3)$$

Em que:

A: média das absorbâncias dos tubos sem amostra (branco do claro);

A: médias das absorbâncias dos tubos contendo as amostras;

B: média das absorbâncias dos tubos contendo amostras, mantidos no escuro (branco do escuro).

5.9.3 Catalase (CAT) (EC 1.11.1.6)

A determinação da atividade da enzima CAT foi realizada por meio da adição de 25 µL do extrato bruto e 200 µL de H₂O₂ 250 mmol L⁻¹ a 3,775 mL de meio de reação contendo tampão fosfato de potássio 200 mmol L⁻¹ (pH 7,0), água ultrapura, previamente incubados a 25 °C (Havir; Mchale, 1989). Posteriormente, as amostras foram levadas para leitura em

espectrômetro de UV-vis (Femto, 700 Plus), sendo realizadas leituras a cada 15 segundos, durante um período de 2 minutos, em 240 nm de comprimento de onda. O coeficiente de extinção H_2O_2 considerado foi de $36 \text{ mmol L}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ e os resultados foram expressos em $\text{nmol min}^{-1} \text{ mg}^{-1}$ proteína (Nakano; Asada, 1981).

5.9.4 Ascorbato peroxidase (APX) (EC 1.11.1.11)

A atividade da enzima APX foi obtida a partir da adição de $50 \mu\text{L}$ do extrato bruto e $200 \mu\text{L}$ de H_2O_2 mmol L^{-1} a $3,750 \text{ mL}$ de meio de reação, contendo tampão fosfato de potássio 200 mM (pH 7,0), água ultrapura e $200 \mu\text{L}$ de ácido ascórbico 10 mmol L^{-1} , previamente incubados a $28 \text{ }^\circ\text{C}$ (Nakano; Asada, 1981). Leituras em espectrômetro de UV-vis (Femto, 700 Plus) foram realizadas no comprimento de onda de 290 nm , a cada 15 segundos, em um período de 3 minutos, observando-se o decréscimo da atividade da enzima. O coeficiente de extinção H_2O_2 considerado foi de $2,8 \text{ mmol L}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ e os resultados foram expressos em $\text{mmol min}^{-1} \text{ mg}^{-1}$ proteína (Nakano; Asada, 1981).

5.10 Trocas gasosas

Aos 40 DAS, as plantas foram avaliadas quanto à assimilação líquida de CO_2 (A, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), transpiração (E, $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática (gs, $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e concentração interna de CO_2 (C_i , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$), utilizando-se um analisador portátil de fotossíntese por radiação infravermelha (IRGA - LI-6400XT, LICOR, Nebraska, EUA) (Figura 3). A eficiência de uso da água (EUA, kg m^{-3}) foi determinada a partir da relação entre A e E.

As medições foram feitas em folhas adultas e saudáveis localizadas no terço superior das plantas, considerando as duas linhas centrais de cultivo de repetição, de cada tratamento, dentre as 6 linhas existentes, no período entre 9 e 11 h. A concentração de CO_2 injetada artificialmente na câmara de assimilação do IRGA foi fixada em $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$; a densidade de fluxo de ar

em $300 \mu\text{mol s}^{-1}$ e intensidade luminosa total em $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. O índice SPAD, associado ao conteúdo de clorofila, também foi determinado empregando-se um equipamento CCM-200 plus Chlorophyll Content Meter.



Figura 3. Feijão-comum variedade BRS Radiante cultivado na área experimental da Estação Experimental de Biologia (UnB) em Brasília – DF (A, B); Coleta de dados com o IRGA (C, D); Coleta de dados do índice SPAD (E).

5.11 Produtividade e peso de cem grãos

5.11.1 Produtividade

A produtividade de grãos (PG) foi determinada pela colheita de 20 plantas das 2 linhas centrais de cada repetição, de cada tratamento, realizando-se a pesagem do material em balança analítica e utilizando o *stand* final das plantas de 150 mil ha^{-1} para extrapolação dos dados para kg ha^{-1} . Realizou-se também a determinação do peso de cem grãos e, posteriormente, os grãos foram levados à estufa de circulação forçada, a $65 \text{ }^\circ\text{C}$, para secagem até a massa constante

visando determinar a umidade do material. Dessa forma, realizou-se a correção para a umidade de colheita do feijão a 13% pois ao ajustar a umidade para esse valor, as sementes têm uma maior estabilidade e durabilidade, garantindo a integridade das amostras durante o processo de análise, de acordo com as Regras de Análise de Sementes do MAPA (Brasil, 2009).

5.12 Indicadores de qualidade dos grãos (composição centesimal)

5.12.1 Umidade

Inicialmente, foi realizada a pré-secagem das amostras, com os grãos de feijão sendo colocados em sacos de papel semi kraft e levados para estufa a 105 °C (Ethik, 410-3D) por 24 h, realizando-se pesagens antes e depois da pré-secagem. As amostras, depois de secas, foram trituradas em um moinho (TE-631, Tecnal) e utilizadas para as análises subsequentes de composição nutricional. O material triturado (1,5 g) foi então acondicionado em cadinho de porcelana e levado novamente à estufa, a 105 °C, por mais 24 h, de acordo com as Regras para Análise de Sementes do MAPA (Brasil, 2009).

5.12.2 Teor de cinzas

A análise do teor de cinzas seguiu o Método Oficial AOAC® 930.05, com modificações (Association of Official Analytical Chemists - AOAC, 2002). As mesmas amostras utilizadas para determinação da umidade foram utilizadas, sendo agora levadas para incineração em um forno mufla (Linn Elektro Therm, KK Series), à temperatura de 550 °C, para obtenção das cinzas, que foram novamente pesadas e utilizadas na Equação 4.

$$\%Cinzas = \frac{\text{Peso das cinzas} \times 100}{\text{Peso da amostra}} \quad (4)$$

5.12.3 Teor de lipídios

O teor de lipídios foi determinado de acordo com o método Am 5-04 (American Oil Chemists' Society - AOCS, 2004). Para isto, 1 grama de grãos triturados, acondicionados em sacos de papel-filtro e selados, foram acondicionados em estufa (Ethik, 410-3D) a 105 °C, por aproximadamente 1 h e 30 min, sendo pesados novamente. Em equipamento extrator de lipídios (ANKOM^{XT10} Extractor, Ankom Technology), foram adicionados à amostra previamente seca e éter de petróleo, utilizando-se temperatura de 100 °C, por 60 minutos. As amostras foram novamente para a estufa e dessecador, possibilitando assim a nova pesagem. Os valores obtidos foram utilizados na Equação 5.

$$\% \text{Lipídios} = \frac{\text{Peso seco} - \text{Peso extraído}}{\text{Peso da amostra}} \times 100 \quad (5)$$

5.12.4 Teor de proteínas

O teor de proteínas foi obtido de acordo com o Método de Kieldahl modificado nº 037/IV (Instituto Adolfo Lutz – IAL, 2008). Amostras de 0,3 g de feijão triturado foram aquecidas com ácido sulfúrico e mistura catalítica em bloco digestor, à temperatura de 400 °C gradativamente. Posteriormente, os tubos digeridos foram acoplados a um destilador de nitrogênio (TE-0363, Tecnal) juntamente com béquer contendo 7,5 mL de ácido bórico 4% e duas gotas de indicador vermelho de metila com azul de metileno. Hidróxido de sódio 50% foi acrescentado aos tubos para a destilação. Posteriormente, foi realizada titulação com ácido clorídrico 0,1 mol L⁻¹ e a quantidade de proteína bruta foi conferida pela Equação 7.

$$\% \text{Nitrogênio Total} = \frac{V \times N \times f \times 14 \times 100}{P} \quad (6)$$

$$\% \text{Proteínas} = \% \text{NT} \times F \quad (7)$$

Em que,

V: volume de ácido clorídrico utilizado na titulação;

M: molaridade da solução de ácido clorídrico;

f :fator de correção da solução de ácido clorídrico;

NT: quantidade de nitrogênio total;

F: fator de conversão de 6,25.

5.12.5 Teor de carboidratos

Para o teor de carboidratos, foi seguida a Resolução RDC N° 360 de dezembro de 2003 (Brasil, 2003), em que o teor de carboidratos é considerado o material que permanece após a remoção das proteínas, gorduras, fibra alimentar, umidade e cinzas (Universidade de São Paulo - USP, 2020). Desta forma, a quantificação foi realizada de acordo com a Equação 8.

$$\text{Carboidratos(g/100 g)} = 100 - P - L - U - C \quad (8)$$

Em que:

P: total de proteínas (g 100 g⁻¹);

L: total de lipídios (g 100 g⁻¹);

U: total de umidade (g 100 g⁻¹);

C: total de cinzas (g 100 g⁻¹).

5.13 Análise estatística dos dados

Os dados obtidos foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk e posteriormente foi realizada a análise de variância para dados com distribuição normal. Variáveis com efeito significativo foram submetidas ao teste de Tukey (5%) e análise de regressão. Dados que não apresentaram normalidade foram transformados por raiz de x para alcançar a normalidade, porém houve variáveis que não alcançaram a normalidade em nenhuma

das transformações sugeridas e testadas. Todas as análises foram avaliadas empregando-se o software SISVAR versão 4.1 (Ferreira, 2011).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Concentração-resposta da Arbolina®

As variáveis MFA, MSPA, MSR e AE não foram afetadas pela aplicação da Arbolina® (Tabela 3). De forma semelhante, os testes com o bioestimulante Stimulate®, utilizando tanto as cultivares Pérola e BRS Esteio, não resultaram em diferença para as variáveis MSPA e MSR (Almeida *et al.*, 2014). Santos *et al.* (2017) também não observaram efeito para AE quando testaram o produto comercial Stimulate® e Booster Mo® na variedade BRS Estilo.

Já para as variáveis MFR, IAF e NF, observou-se resposta quadrática, com pontos de máxima modelados de 245,00, 210,00 e 198,75 mg L⁻¹, respectivamente. Baseando-se nesses pontos, obteve-se a concentração média de 217,92 mg L⁻¹, utilizada no experimento subsequente de cultivo em campo.

Tabela 3. Modelo de concentração-resposta obtido a partir da aplicação de Arbolina® em feijoeiro, coeficiente de correlação (R²) e ponto de inflexão (dose mais benéfica) para massa fresca de raiz (MFR), índice de área foliar (IAF), número de folhas (NF).

| Variável | Equação | R ² | Dose mais benéfica (mg L ⁻¹) (dx/dy): b ₁ +2(b ₂)x = 0 |
|--------------|--------------------------------------|----------------|--|
| MFR | $y = -0,00002x^2 + 0,0098x + 6,7043$ | 0,8965 | 245,00 |
| IAF | $y = -0,00007x^2 + 0,0294x + 50,012$ | 0,9277 | 210,00 |
| NF | $y = -0,00004x^2 + 0,0159x + 10,971$ | 0,8814 | 198,75 |
| MÉDIA | | | 217,92 |

MFR = massa fresca de raiz; IAF = índice de área foliar e NF = número de folhas.

6.2 Avaliações biométricas

Para MSR e MST, não houve interação entre Arbolina® e as diferentes lâminas de irrigação avaliadas (Anexos 2 a 4). Todavia, houve resposta na avaliação das lâminas, com as plantas que receberam 90 e 100% da ETc apresentando valores de MSR, em média, 26% maiores que as plantas sob 70% de ETc (Figura 4A). Para a MST (Figura 4B), os menores valores foram observados com a menor lâmina de irrigação aplicada, sendo 21% menor que a média das demais (Figura 4B).

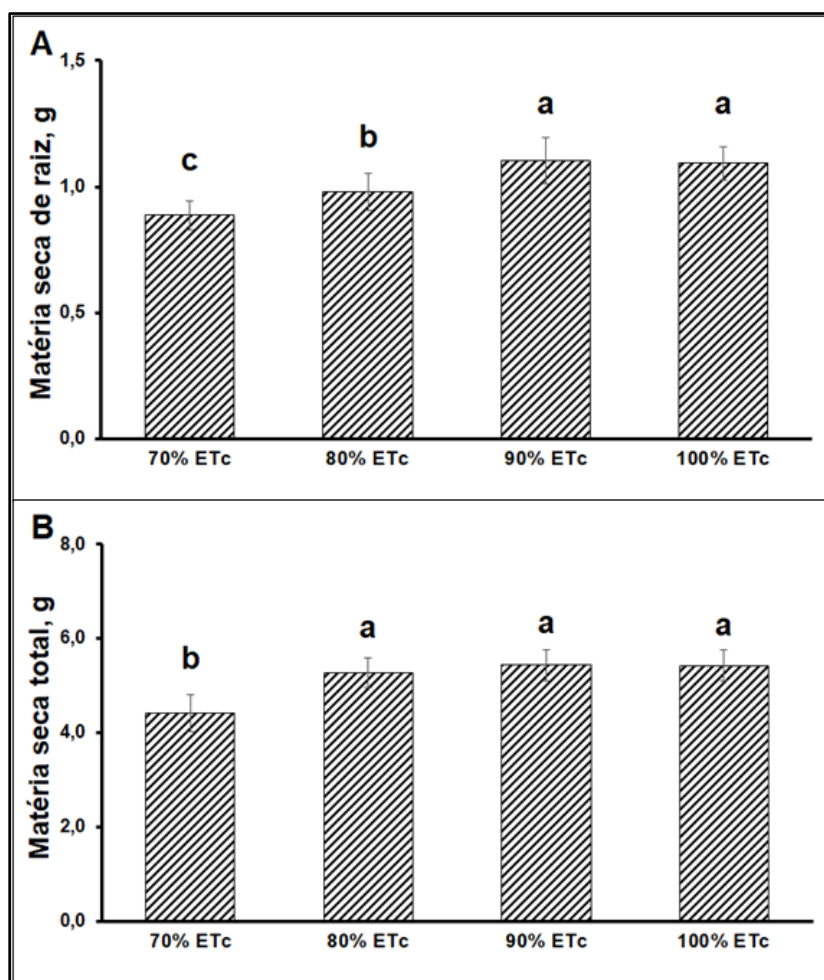


Figura 4. Matéria seca de raiz (A) e matéria seca total (B) em função da aplicação de diferentes lâminas de irrigação (70, 80, 90 e 100% ETc) em feijoeiro.

Lemoine *et al.* (2013) afirmaram que o déficit hídrico é um dos fatores abióticos de maior influência no rendimento de culturas, com a falta de água durante o processo de desenvolvimento da estrutura vegetal sendo considerado desfavorável, principalmente para seu enraizamento no solo. O crescimento do sistema radicular de plantas cultivadas em ambiente com restrição hídrica é afetado pela perda de turgor das células do meristema apical, resultando em menor desenvolvimento e acúmulo de biomassa (Taiz *et al.*, 2017). No presente trabalho, maiores valores de MSR foram observados nas maiores lâminas de irrigação aplicadas (90 e 100% da ETc), enquanto o menor valor foi observado com a reposição de somente 70% da ETc (Figura 4B).

López; Pineda; Alamillo (2020) compararam o desenvolvimento de duas cultivares de feijão (PHA-0638 e PMB-0220, sendo a primeira considerada altamente tolerante a estresse hídrico e a segunda moderadamente), cultivadas sob estresse hídrico. A determinação sobre a biomassa das raízes demonstrou que, embora não tenha havido diferença entre as condições avaliadas (de 80 até 40% da capacidade de campo) para nenhuma das cultivares, um ligeiro aumento na MSR foi observado em plantas de PMB-0220, ou seja, as plantas que receberam menor privação de água corresponderam com maior quantidade de MSR.

Dentre as avaliações realizadas em genótipos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) sob níveis de reposição de irrigação deficitários, a MST evidenciou que os níveis de água aplicados no solo influenciaram os resultados sob o desempenho do crescimento e desenvolvimento das plantas, incluindo a MST, no final do cultivo (Melo *et al.*, 2018). Considerando-se as cultivares testadas, BRS Marataoã apresentou maior MST diante das maiores lâminas de irrigação (80 e 100% ETc) (Melo *et al.*, 2018). Este resultado corrobora com o obtido no presente trabalho, apontando para a maior produção de MST nas plantas que receberam maior lâmina de irrigação.

6.3 Enzimas associadas ao estresse oxidativo

6.3.1 Superóxido dismutase (SOD)

Houve diferença para a atividade enzimática da SOD somente entre as diferentes lâminas de irrigação aplicadas, sem efeitos para a aplicação ou não da Arbolina® (Anexos 14 e 15). A SOD é uma enzima antioxidante responsável por eliminar EROs do metabolismo celular, agindo logo no momento inicial de defesa contra o estresse oxidativo, uma vez que catalisa a dismutação, ou seja, acelera o processo de transformação do radical superóxido (O_2^-), agente oxidante, a peróxido de hidrogênio (H_2O_2), este já menos prejudicial às células (Caverzan *et al.*, 2016; Pandey *et al.*, 2016). Assim, o H_2O_2 gerado poderá então ser convertido para H_2O através da ação das demais enzimas CAT e APX, principalmente (Hasanuzzaman *et al.*, 2020). Portanto, quanto maior a atividade SOD, maior será a eficiência do mecanismo para defesa antioxidante, evidenciado nas plantas que não tiveram déficit hídrico (100% ETc), por exemplo.

A produção e eliminação de EROs são mantidas em equilíbrio pelos mecanismos de defesa antioxidantes, quando em condições ambientais favoráveis (Gill e Tuteja, 2010), entretanto sob déficit hídrico (Gama, 2023), esse equilíbrio possivelmente sofreu alteração e houve maior acúmulo de EROs do que sua eliminação, gerando um possível distúrbio no sistema metabólico antioxidante do feijoeiro, reduzindo a atividade SOD nas lâminas de água intermediárias aplicadas (80 e 90% ETc), as quais reportaram os menores valores para a atividade da enzima.

O reconhecimento do H_2O_2 como causador de danos em plantas sob estresse já foi retratado, porém já considera-se também como componente integral ou mensageiro secundário das cascatas de sinalização entre as células (Mittler, 2002; Silva *et al.*, 2015). Diante desse duplo mecanismo, Gill; Tuteja (2010) apontam que em baixas concentrações, o H_2O_2 possui função de sinalizador, podendo direcionar a aclimação e tolerância à determinada condição de estresse, mas em altas concentrações, pode levar à morte celular programada. A partir de

uma alta produção de H_2O_2 , é necessária uma resposta imediata do sistema antioxidante da planta para que o mesmo funcione como um mensageiro secundário de forma efetiva (Carvalho, 2008; Silva *et al.*, 2015).

O aumento na concentração de H_2O_2 tem sido, de forma geral, associado à intensidade do déficit hídrico, como Siddiqui *et al.* (2015) relataram em feijão-fava. Entretanto, no presente estudo, também foi verificada alta produção de H_2O_2 , ou seja, alta atividade enzimática SOD para o feijoeiro, no tratamento sem déficit hídrico, apesar da pouca diferença (aproximadamente $0,08 U mg^{-1} prot$) entre os valores de SOD para maior e menor lâmina aplicadas. A lâmina de irrigação estimada para o menor nível encontrado dessa enzima é de 81,44% da ETc.

Diante da restrição hídrica, todo o metabolismo de crescimento, desenvolvimento e defesa do feijoeiro é afetado (Lopes, 2017). Segundo Basu *et al.* (2009), o aumento ou mesmo a manutenção da atividade da SOD está associada à tolerância, enquanto a sensibilidade ao déficit hídrico está associada à redução da atividade desta enzima. Gama (2023), a fim de analisar a variabilidade para tolerância ao déficit hídrico em germoplasma de feijão-comum, obteve maior atividade da SOD em genótipos de maior nível de tolerância à seca em comparação com aqueles mais sensíveis, destacando-se através disso como enzimas que atuam no aumento da tolerância ao déficit hídrico (Gama, 2023).

Ataides (2018) testou dois genótipos de feijões crioulos, Amarelinho e Roxinho, a fim de avaliar a plasticidade sob condições de restrição hídrica de 40 e 100% da ETc, com temperaturas de 25 e 40 °C e a combinação entre os fatores. Foi obtido aumento da atividade enzimática SOD no genótipo Amarelinho sob os tratamentos de déficit hídrico e déficit hídrico junto com alta temperatura, resultando em aproximadamente $1,3 U mg^{-1} prot$, valor 5% menor do que o encontrado no presente trabalho tanto para a menor, quanto para a maior lâmina de irrigação (Ataides, 2018).

O equilíbrio no nível de SOD em uma planta com outras enzimas eliminadoras de H_2O_2 , por exemplo CAT e APX, é crucial para prevenção do acúmulo de EROs (Silva *et al.*, 2021). A SOD e a CAT são consideradas as duas enzimas de maior importância para tolerância de plantas a estresses abióticos e, especificamente, a CAT, localizada nos peroxissomos, atua na remoção do H_2O_2 gerado pela fotorrespiração e via β -oxidação de ácidos graxos, convertendo-o em H_2O e O_2 (Dumanović *et al.*, 2020; Gama, 2023; Gill e Tuteja, 2010; Kaciené *et al.*, 2015).

6.3.2 Atividade enzimática catalase (CAT)

Houve diferença para a atividade enzimática CAT para todos os fatores testados, lâminas aplicadas, presença de Arbolina[®] e interação entre eles (Anexo 17 e 18). É possível observar (Figura 5) que a aplicação de Arbolina[®] reduziu aproximadamente 30% a atividade da CAT, indicando que o produto possa ter efeito modulador sobre a atividade antioxidante no feijoeiro.

Considerando o papel biológico da atividade da enzima e como sinalizam e direcionam adaptações fisiológicas nas plantas sob condições de estresse abiótico, sugere-se que as plantas que receberam o bioestimulante vegetal não tiveram a necessidade de maior produção de CAT, pois as condições de estresse das plantas diminuíram, visto que o aumento da CAT em tratamentos com aplicação desses produtos indicam uma maior eficiência na eliminação de H_2O_2 e maior tolerância do feijoeiro a estresses (Silva *et al.*, 2021). Portanto, a necessidade da planta de gerir maiores níveis de CAT visando diminuir os danos oxidativos gerados pelo estresse foi substituída pela ação da Arbolina[®].

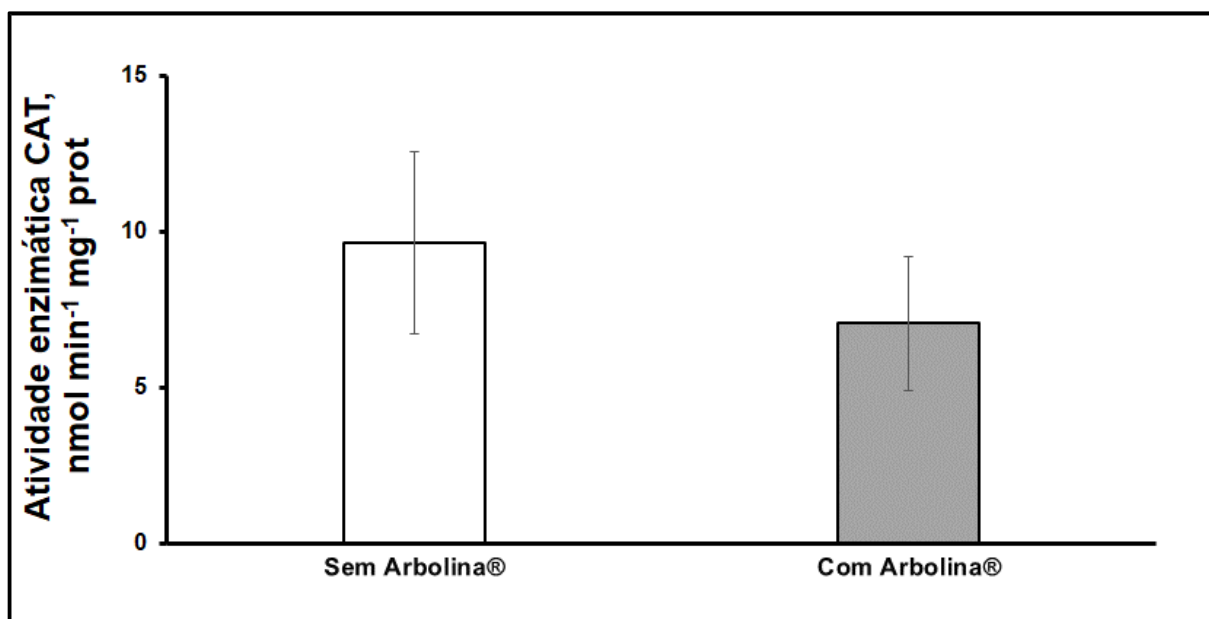


Figura 5. Atividade enzimática catalase (CAT) em função da aplicação de Arbolina® no feijoeiro.

Mendes (2019) determinou a influência do tratamento de sementes com bioestimulantes, e sua interação com inseticida e fungicida, sobre as enzimas antioxidantes em soja (*Glycine max* L.) cultivada sob condições de déficit hídrico e observou interação entre bioestimulantes e restrição hídrica para as concentrações de CAT, onde os tratamentos com Biozyme®, na presença e ausência de Imidacloprido, Carboxina e Tiram, apresentaram-se como mais eficientes em manter baixos valores para a baixa atividade enzimática aos 14 dias após aplicação. Aos 21 após a aplicação, foi verificada elevada atividade CAT na testemunha sob restrição hídrica, enquanto os tratamentos YaraVita Raiz®, com e sem Imidacloprido, Carboxina e Tiram, Nitrostarter® + Phylgreen Gemma® e para Biozyme® com Imidacloprido, Carboxina e Tiram, mantiveram baixa atividade da mesma.

A maior atividade enzimática CAT encontrada por Rosa (2020), avaliando diferentes formulações e doses de bioestimulante composto por ácidos fúlvicos e extrato de alga marinha *A. nodosum* (L.) em soja (*Glycine max* (L.)) com déficit hídrico, foi sob a formulação 1 (14%

dos compostos) com a dose de 0,5 kg ha⁻¹, enquanto na formulação 2 (15%) os maiores valores ocorreram pelas doses de 1,0 kg ha⁻¹ e 0,25 kg ha⁻¹ e na formulação 3 (21%), os maiores valores foram observados nas duas menores doses. Os tratamentos com bioestimulante, nesse estudo, aumentaram 54% a CAT em relação ao controle com déficit hídrico e 74% em relação ao sem déficit (Rosa, 2020).

Silva *et al.* (2021), objetivando testar o efeito protetivo do bioestimulante vegetal FH Attivus® com diferentes doses no feijoeiro exposto a temperaturas abaixo do ideal (<20 °C), verificaram a maior atividade da enzima CAT entre 1 a 1,2 U mg⁻¹ prot, respectivamente, na dosagem de 0,25 e 1,0 kg ha⁻¹, diante das formulações com 15 e 21% de *A. nodosum* e ácidos fúlvicos, além de diferentes concentrações nutricionais, caracterizando um mecanismo de defesa antioxidante mais eficiente (Silva *et al.*, 2021).

No presente estudo, a atividade da CAT apresentou tendência de diminuição com o aumento da disponibilidade de água (Figura 6). Entretanto, sua maior atividade foi observada na lâmina de 80% ETC, valor 71% maior do que a média das demais lâminas e 100% maior quando comparada com as duas maiores lâminas.

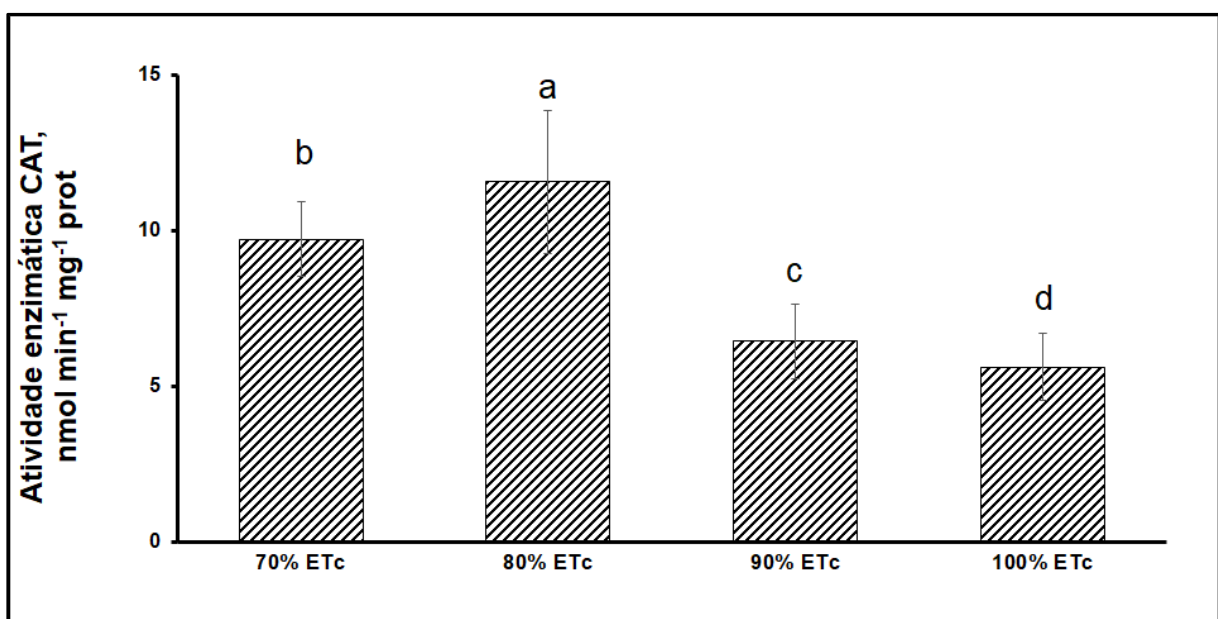


Figura 6. Atividade enzimática catalase (CAT) em função da aplicação de diferentes lâminas

de irrigação (70, 80, 90 e 100% ETc) no feijoeiro.

Ferreira; Nobre; Macedo (2020) caracterizaram alterações em plantas de feijão submetidas à aplicação foliar de biorreguladores, sob regimes hídricos de 60 e 80% ETc, e observaram valor 20% maior da CAT nas amostras controle com lâmina de 80% da ETc comparando-se com a de menor volume de água aplicado. Cavalcante *et al.* (2021) avaliaram a atuação do ácido salicílico e da metionina como atenuadores do déficit hídrico na cultivar de feijão BRS Novaera e observaram que a partir da imposição de estresse hídrico de 80% ETc, houve aumento na atividade da CAT em 66% nas plantas em aplicação dos possíveis atenuadores em comparação com o tratamento sem estresse hídrico.

Borella *et al.* (2017) avaliaram respostas do feijoeiro (cultivares Expedito e Macotaço) sob estresse hídrico e observaram que o aumento da CAT em uma das cultivares (Macotaço) foi relacionado com o aumento na produção de H₂O₂. Dutra *et al.* (2017) e Filho (2019) também verificaram incremento na atividade da CAT ao analisarem o feijoeiro submetido ao déficit hídrico. O aumento da atividade das enzimas do complexo antioxidativo na condição de deficiência hídrica, em destaque SOD, CAT e APX, é considerado um mecanismo comum para promover a remoção de EROs formadas em condições de estresse, auxiliando na integridade e estabilidade de membranas e estruturas celulares, pelo qual facilita o processo de osmorregulação a partir de ajustes osmóticos (Barbosa *et al.*, 2014).

No presente estudo, a maior produção enzimática na terceira maior lâmina de água aplicada pode estar relacionada com a taxa de transpiração obtida das plantas de mesmo tratamento, visto que para essa variável E, as plantas perante lâmina de 80% ETc, diferiram apenas da lâmina de 90% ETc, sugerindo que quanto maior a taxa de transpiração conferida do feijoeiro, maior a taxa fotossintética naquele momento, com a otimização da abertura dos

estômatos para maximizar a absorção de CO₂ associada à minimização da perda de água, inclusive no período sob estresse pelo déficit hídrico.

6.3.3 Peroxidase

Houve diferença para todos os fatores, diferentes lâminas aplicadas, presença de Arbolina® e interação entre eles, na avaliação da atividade da APX (Anexos 19 e 20). Nesse caso, juntaram-se, também, equações de regressão (Anexo 21, Figura 7). Nota-se que a maior atividade da enzima foi verificada na lâmina estimada de 86,15% ETc, no valor de 1,37 mmol min⁻¹ mg⁻¹ prot, significando o pico de produção da enzima, pois a tendência de atividade enzimática após a aplicação de 90% de ETc foi de diminuição.

A maior atividade da APX em condições de estresse é justificada pela necessidade de eliminação do H₂O₂ produzido pela atividade da SOD, assim como pela possível taxa de fotorrespiração (Carneiro *et al.*, 2011). De forma semelhante, Gama (2023) também obteve maior atividade de APX em genótipos cultivados sob déficit hídrico, sugerindo que esse mecanismo pode ser considerado dentre as principais estratégias da própria cultivar para detoxificação do sistema celular, a fim de reduzir os seus impactos perante seus processos fisiológicos (Gama, 2023).

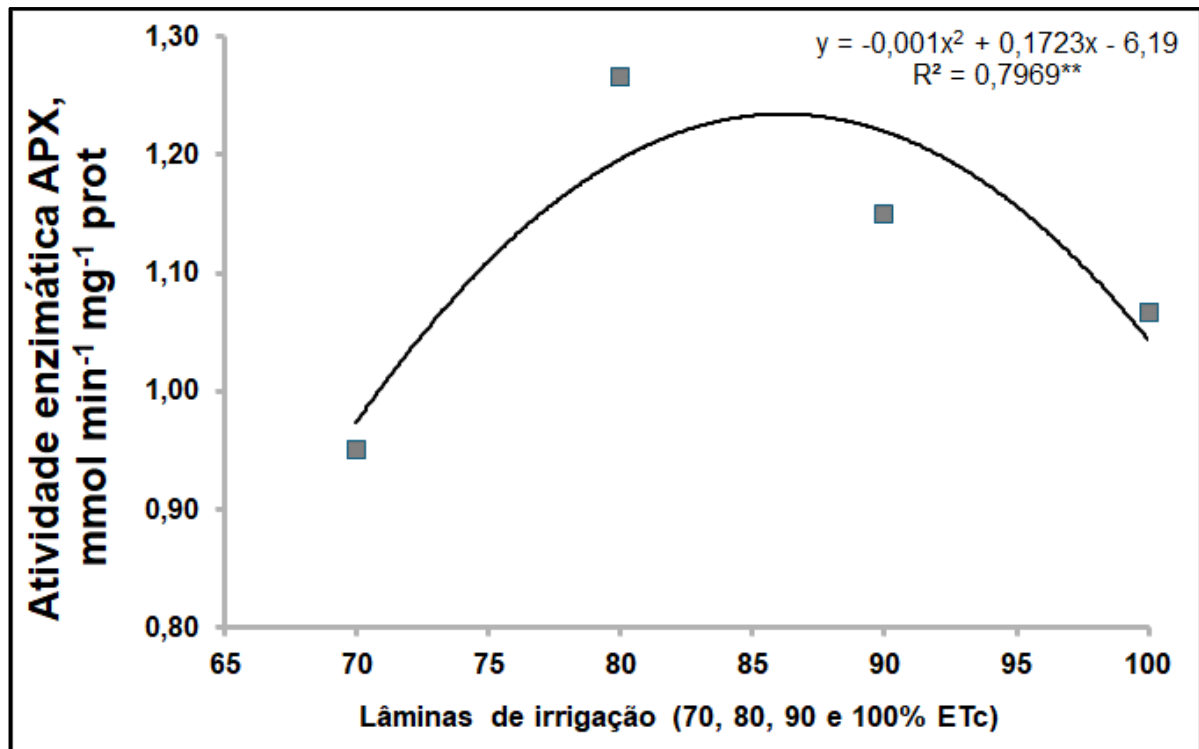


Figura 7. Relação entre a atividade enzimática APX e lâminas de irrigação (70, 80, 90, 100% ETC).

A tendência de redução da APX em feijoeiro cultivado com lâminas de 60 e 80% de ETC foi também relatado por Ferreira; Nobre; Macedo (2020), sinalizando que o aumento da lâmina aplicada resulta em diminuição do déficit hídrico nas plantas. Portanto, a relação com o resultado do presente trabalho está baseada no metabolismo antioxidativo do feijoeiro em diminuir sua produção de APX conforme o aumento no aporte hídrico, amenizando a necessidade da planta em produzir enzimas na tentativa de conter os níveis de EROs.

A partir do momento que a atividade enzimática SOD é aumentada, principalmente em plantas que possuem maior habilidade para eliminar superóxido das células, as enzimas secundárias de neutralização, como CAT e APX, passam a exercer função primordial de neutralização, responsáveis pela conversão e redução do nível de H₂O₂, pelo qual auxilia na mitigação do dano celular causado pelo estresse (Rodrigues, 2016; Sekmen *et al.*, 2014). A enzima APX utiliza o H₂O₂ para realizar a redução do peróxido de hidrogênio à água, desta

forma removendo o mesmo dos tecidos vegetais, principalmente do citosol e cloroplasto, possibilitando uma proteção às plantas de ambientes com situações adversas de estresse (Sharma *et al.*, 2012).

Albrecht *et al.* (2011) constaram a melhoria da resistência ao estresse hídrico em plantas submetidas à aplicação de produtos bioestimulantes, onde o nível das atividades enzimáticas aumentaram, principalmente a de APX, assim como a resiliência do metabolismo vegetal através da eficiência fotoquímica. Diante dessas considerações e da atividade da APX verificada em função da aplicação da Arbolina® (Figura 8), o valor de atividade dessa enzima foi 43% menor, sendo possível relacionar a mesma hipótese anterior, perante a baixa na atividade enzimática CAT com a aplicação do produto, onde os níveis de APX também foram verificados como menores quando as plantas receberam o bioestimulante. Da mesma forma que já mencionado, supõe-se menor necessidade da atividade das enzimas antioxidantes em plantas tratadas com a Arbolina®, diminuindo o estresse no metabolismo do feijoeiro via aplicação de Arbolina®.

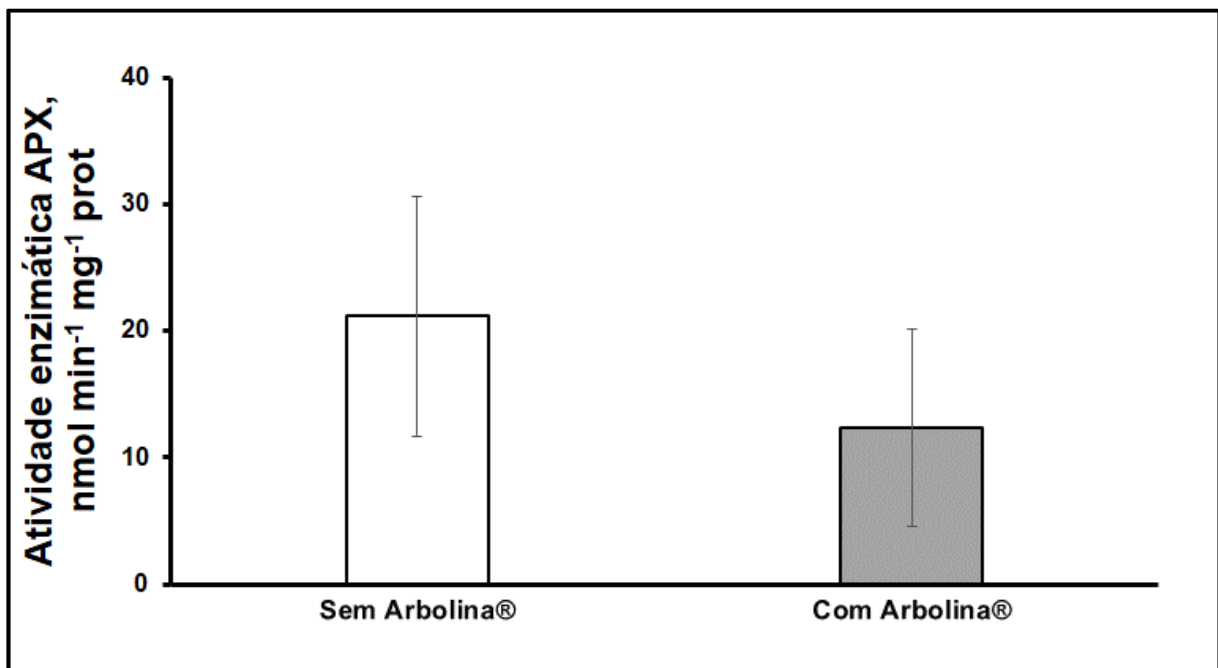


Figura 8. Atividade enzimática catalase (APX) em função da aplicação de Arbolina® no feijoeiro.

A atividade da APX aumentou com o aumento da porcentagem das lâminas (Figura 9), diferente dos resultados observados para CAT. A única semelhança observada entre APX e CAT foi a maior atividade observada com a lâmina de 80% ETc. A atividade da APX foi 158% maior na lâmina de 80% de ETc comparando-se com a média das demais lâminas e foi 121% maior quando comparada às duas maiores lâminas. Esse específico maior valor encontrado pode estar relacionado com a ocorrência de maiores trocas gasosas e produção de fotoassimilados pela parcela do feijoeiro em questão, mesmo sob déficit hídrico.

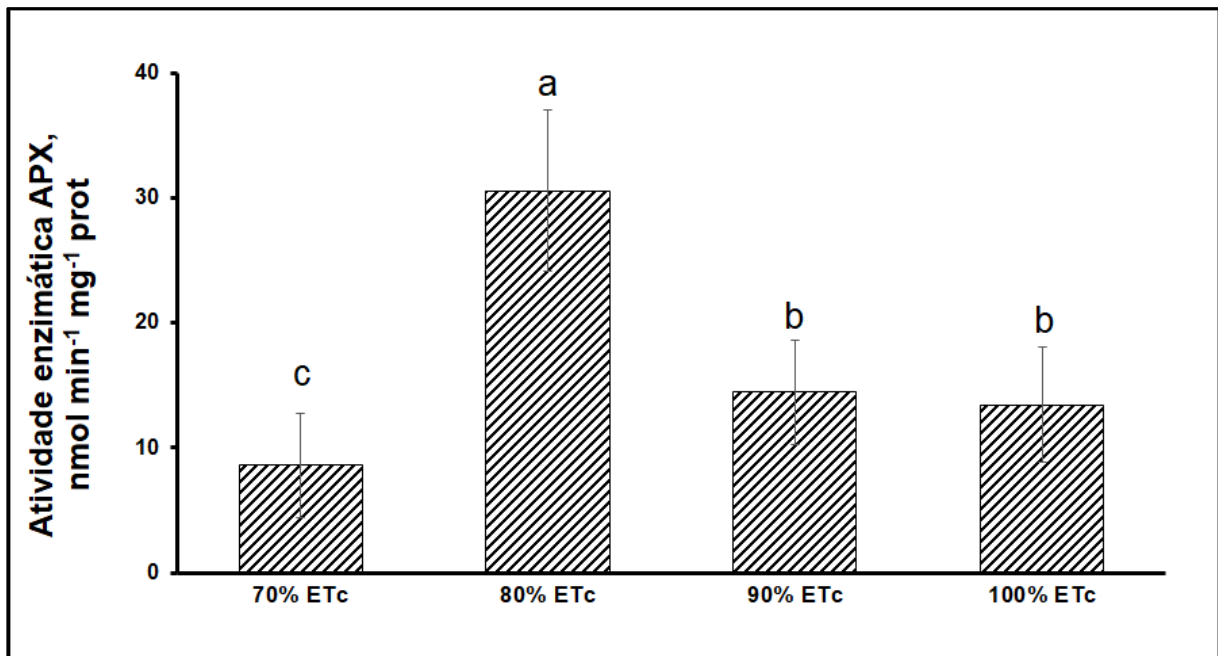


Figura 9. Atividade enzimática catalase (APX) em função da aplicação de diferentes lâminas de irrigação (70, 80, 90 e 100% ETc) no feijoeiro.

As plantas possuem regulações osmóticas complexas que podem não seguir uma lógica linear direta em determinados casos, havendo possibilidades de ocorrer interações entre diferentes fatores internos e externos que influenciam a expressão gênica e atividade enzimática, sugerindo-se que sob o regime de 80% ETc, o feijoeiro possa ter realizado mecanismos específicos que resultaram na maior atividade enzimática de APX, e sob condições

de estresse abiótico, podem expressar certos genes estruturais e/ou regulatórios a fim de manter a integridade do metabolismo celular vegetal (Warsi; Howladar; Alsharif, 2023).

A APX não desempenha papel significativo em condições normais de crescimento da planta, mas, em condições de estresse, melhora os danos lesão oxidativos das células e são capazes de promover seu desenvolvimento (Li *et al.*, 2009). Reduções de APX verificadas por Oliveira (2020), que avaliou a aplicação foliar de ácido salicílico e metionina em feijão-caupi, foram associadas ao aumento na concentração de H₂O₂ para o tratamento de restrição hídrica no solo, justificado pela proteólise (processo de degradação de enzimas por proteínas ou digestão intramolecular), consequência da redução do status hídrico das plantas mediante a exposição do déficit hídrico.

A APX tem sua atividade aumentada gradativamente com o prolongamento do estresse hídrico, a fim de aliviar o estresse oxidativo em seu metabolismo e, baseando-se nisso, cultivares que apresentam a atividade dessa enzima naturalmente elevada possuem tendência de serem mais tolerantes ao estresse hídrico (Ajithkumar; Panneerselvam, 2014; Júnior, 2017; Sales *et al.*, 2013). Araújo *et al.* (2021) avaliaram o desempenho de cultivares de feijoeiro submetidos ao déficit hídrico e observaram que a restrição hídrica afeta de forma distinta as atividades enzimáticas de CAT, SOD e APX, de forma semelhante ao reportado no presente estudo.

6.4 Trocas gasosas e eficiência do uso de água

Não houve diferença para as diferentes lâminas de irrigação, aplicação de Arbolina® ou interação entre eles em relação à assimilação líquida de CO₂ - A (Anexo 5). O valor médio observado entre todos os tratamentos foi de 25 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, semelhante ao encontrado por Santos (2021), que reportou valores de 24,88 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ em plantas de feijoeiro com a cultivar TAA DAMA. Apesar da ausência de significância, houve, numericamente, um ligeiro

incremento de 1,65% entre as lâminas 90 e 100% ETc (Figura 10A).

A energia luminosa é captada pelas plantas e transformada em biomassa a partir do processo fotossintético. Porém, quando há estresse hídrico, observa-se redução dos valores de assimilação líquida de CO₂ (Santos, 2021). Isso pode ser explicado pelo efeito da escassez de água no solo sobre o fechamento estomático, reduzindo, assim, a captação e assimilação do CO₂ atmosférico (Endres *et al.*, 2010). A abertura estomática favorece a absorção de CO₂ e, com o fechamento dos estômatos, ocorre economia de água no metabolismo vegetal pela diminuição da transpiração, restringindo o risco de desidratação (Júnior *et al.*, 2019). Para o feijoeiro cultivado sob restrição hídrica, também ocorre menor abertura estomática, dificultando assimilação do carbono no metabolismo fotossintético (Melo *et al.*, 2018). Lucena (2023) também avaliou as trocas gasosas em feijão e observou que, sem restrição hídrica (100% da ETc), a cultivar BRS Tapaihum apresentou valor de A 27% maior que as demais cultivares avaliadas. Júnior *et al.* (2019), avaliando a resistência ao estresse hídrico de 4 genótipos de fava sob 3 regimes de irrigação, encontraram valor de A, para fava branca, superior às demais avaliadas na condição de irrigação sem déficit, 21 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ aproximadamente, valor próximo ao do presente trabalho.

Em relação à condutância estomática (*gs*), os dados coletados não seguiram distribuição normal (Anexo 6), mesmo após a realização do teste Kruskal-Wallis (Anexo 7). No entanto, pôde-se observar que as plantas submetidas ao tratamento com 90% de ETc apresentaram valor numericamente maior, na ordem de 18% ($0,26 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) quando comparado ao valor observado nas plantas sob 70% de ETc ($0,22 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Figura 10B).

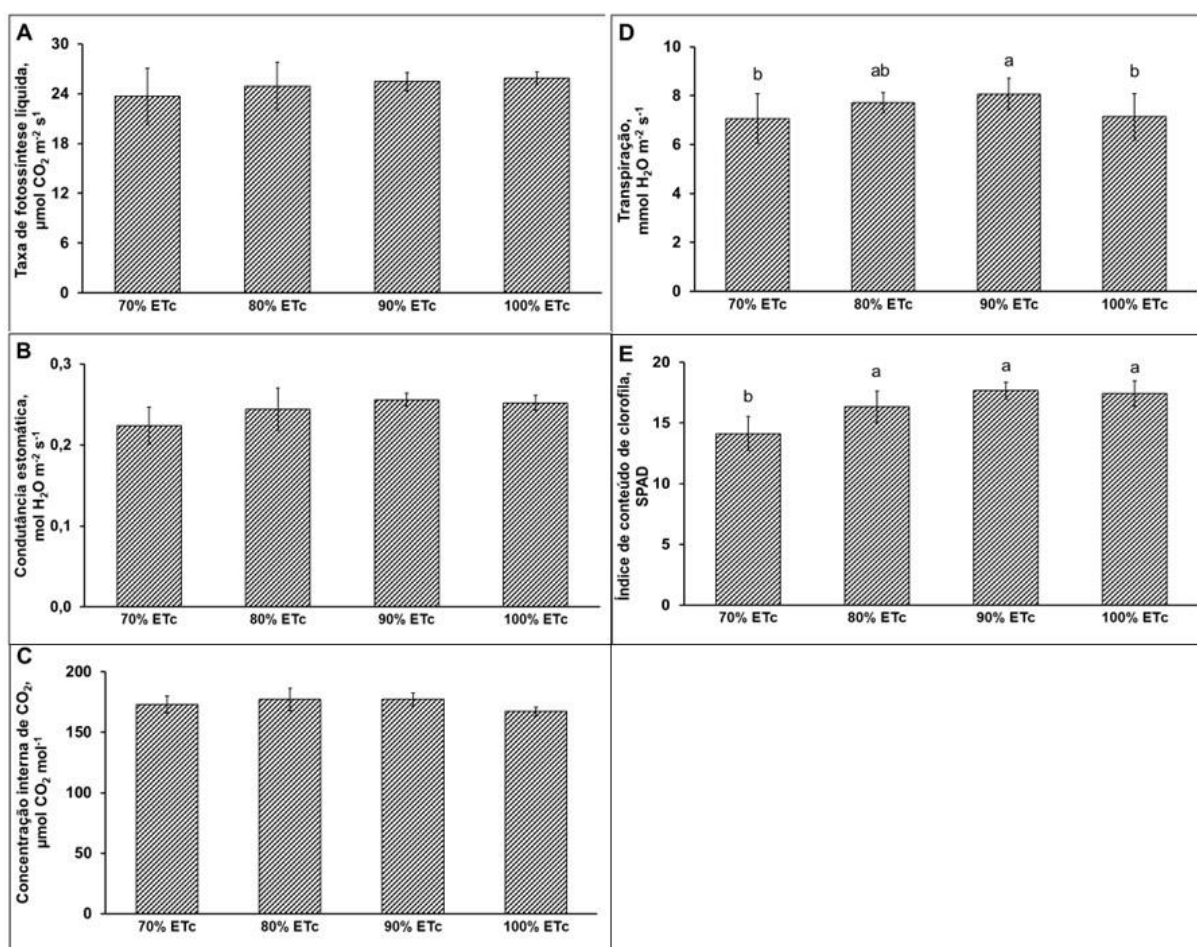


Figura 10. Fotossíntese líquida (A), condutância estomática (B), concentração interna de CO_2 (C), transpiração (D) e índice SPAD (E) em plantas de feijoeiro submetidas a diferentes lâminas de irrigação (70, 80, 90 e 100% ETC) em feijoeiro.

Em condições de déficit hídrico, as plantas respondem principalmente através do fechamento estomático a fim de reduzir a transpiração e evitar perda de água para a atmosfera. Além disso, essa ação controla a absorção de CO_2 pela planta e possibilita assim a redução tanto de perda de água, quanto menor absorção deste gás (Hernandez-Santana *et al.*, 2016; Taiz *et al.*, 2017). Altas concentrações de carbono no metabolismo da planta ocasionam o rápido fechamento das células guardas, mesmo com a presença de luz, sendo indubitavelmente o potencial de água nas folhas o fator principal de controle de abertura e fechamento estomático,

logo o déficit de água provoca o fechamento dos estômatos, assim como o aumento potencial de água tende a abri-los, favorecendo as trocas gasosas na planta (Santos, 2021).

Com isso, mesmo com menos água, a planta com maior abertura de estômatos pode manter uma maior taxa de fotossíntese quando comparada com a planta que recebe mais água, mas que mantém seus estômatos fechados (Asargew *et al.*, 2024), possível de justificar com a taxa de C_i , sendo 6% maior para as plantas que receberam 90% da ETc. Oliveira *et al.* (2005), ao avaliarem o ciclo da cultura do feijão em função de diferentes regimes hídricos, observaram resultado semelhante, de acordo com os menores valores de g_s terem sido encontrados ao longo do ciclo dessa cultura em plantas submetidas aos períodos de irrigação.

Para concentração interna de CO_2 (C_i), não houve diferença entre a aplicação de Arbolina[®], lâminas de irrigação e interação entre os dois fatores (Anexo 8). Contudo, observa-se que o valor de p na avaliação estatística, neste caso, foi superior a 0,05, porém inferior a 0,10, indicando uma tendência de que as diferenças entre os tratamentos de lâmina de irrigação não diferem entre si a nível 5% do teste de Tukey, mas sim ao nível de 10%. A menor concentração de C_i foi verificada na maior lâmina de irrigação, $167 \mu\text{mol } CO_2 \text{ mol}^{-1}$, 5% menor que a média de $176 \mu\text{mol } CO_2 \text{ mol}^{-1}$ entre as demais lâminas (Figura 10C).

Ribeiro *et al.* (2022), avaliando as trocas gasosas e o crescimento inicial do feijão-caupi em diferentes manejos de irrigação com água salina e adubação fosfatada, obtiveram valores de C_i , em média, 35% maiores que os determinados no presente trabalho (irrigação de 100% ETc em condições de água salina ($3,2 \text{ dS m}^{-1}$) apenas na pré-floração). Pereira (2019), com o objetivo de selecionar genótipos de feijão carioca tolerantes ao em déficit hídrico, não obteve diferenças em relação a C_i .

Foi observada diferença entre as diferentes lâminas de irrigação aplicadas nos valores de E, mas sem diferença relacionada à aplicação da Arbolina[®] e interação dos fatores (Anexos 9 e 10). As plantas que receberam a menor lâmina de irrigação apresentaram, em média, valor

5% menor do que as médias entre 100 e 80% da ETc. A maior média foi observada na lâmina de 90% da ETc, resultando em $8,07 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, valor 11% maior que a E realizada pelas plantas que receberam as demais lâminas (Figura 10D).

Como a transpiração da planta depende da abertura de seus estômatos e do fluxo armazenado de CO₂, o comportamento de E foi semelhante ao de Ci, com a maior taxa tranpiratória observada na lâmina com 90% de ETc. Sugere-se, nesse caso, que essas plantas com maior taxa de transpiração responderam de forma compensatória às condições de irrigação entre as lâminas de 80 e 90% ETc, onde as mesmas estiveram em uma condição de que a disponibilidade de água foi suficiente para permitir uma maior E, pois não houve grande restrição de água. No entanto, destaca-se que embora a transpiração tenha sido maior nesse tratamento, o feijoeiro ainda esteve respondendo ao estresse, mas de uma maneira diferente daquelas submetidas a nível maior (menores lâminas), resultando em menores taxas de E.

Para o índice SPAD, houve diferença entre as lâminas de irrigação (Anexos 11 e 12). Menor valor foi observado nas plantas que receberam a lâmina de irrigação de 70% de ETc, sendo 18% menor que a média entre as demais lâminas (Figura 10E). Zuffo *et al.* (2012) relatam que esse índice é feito pelas leituras do clorofilômetro, medidas indiretas da clorofila presente na folha, sendo o teor desta um indicador do nível de nitrogênio nas plantas, pelo qual está altamente correlacionado com a produtividade, devido à associação entre a atividade fotossintética e o teor de N nas folhas. Diniz (2023), avaliando diferentes turnos de rega aplicados ao feijoeiro por gotejamento, não obteve diferença nos valores do índice SPAD. Paffaro (2017), avaliando efeitos de reguladores vegetais em feijoeiro, reportou índice SPAD 106% maior comparado ao obtido no presente trabalho.

Relacionado à EUA, houve efeito para aplicação de Arbolina® (Anexo 13). As plantas que receberam o produto apresentaram EUA 10% maior, independentemente da lâmina de água aplicada (Figura 11). A EUA relaciona a captura de carbono por meio do processo de

fotossíntese e a perda de água (Tang *et al.*, 2014). Deste modo, valores mais elevados dessa variável são desejáveis, uma vez que estarão associados principalmente com a redução das perdas de água das culturas (Silva *et al.*, 2020). Ramos (2013) explicou que a alta taxa de assimilação de CO₂ e baixos valores de condutância estomática e transpiração indicam elevada EUA, sendo esse comportamento compatível com o observado com a aplicação da Arbolina[®], no presente trabalho.

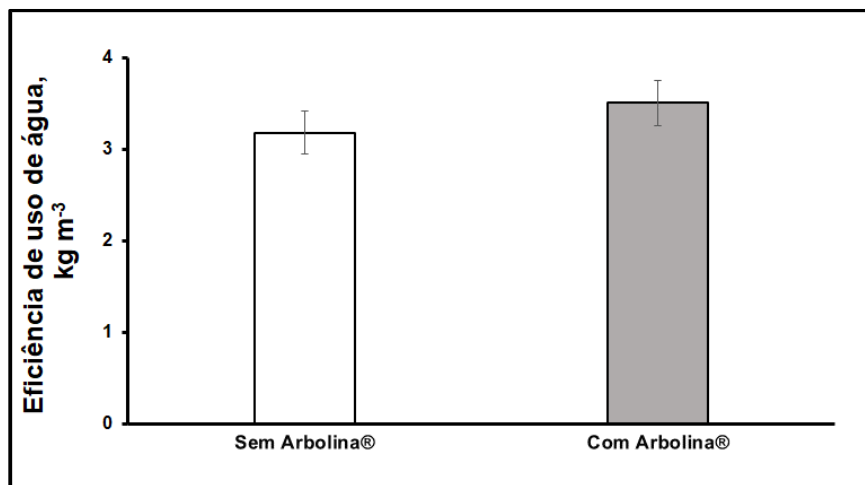


Figura 11. Eficiência de uso de água em função da aplicação de Arbolina[®] em feijoeiro, aos 40 dias após plantio.

A utilização de bioestimulantes vegetais auxilia no desenvolvimento das plantas, melhorando a floração, frutificação e produtividade, assim como influenciando positivamente a eficiência do uso de nutrientes, além de ser capaz de aumentar a tolerância da planta sob estresses abióticos (Rouphael; Colla, 2020). A presença de extratos naturais confere às plantas diversos benefícios fisiológicos relacionados ao balanço hormonal e osmoproteção, atuando nas células vegetais e protegendo de forma mais resistente contra a desidratação das plantas, conferindo a manutenção das atividades metabólicas em níveis adequados mesmo em condições ambientais estressantes (Cavalcante *et al.*, 2020).

Pereira (2019), avaliando a ação de bioestimulantes em tomateiro (*Solanum lycopersicum*) cultivado sob restrição hídrica (100-80% da CC e 70-50% da CC), concluiu que esses produtos mostraram resultados promissores na atenuação do estresse das plantas cultivadas sob déficit hídrico. Houve aumento de EUA quando utilizou-se os produtos à base de aminoácidos e substâncias húmicas extraídas do mineral Leonardita, resultando em 3,1 kg m⁻³, resultado muito próximo ao do presente trabalho, 3,5 kg m⁻³. Em romã (*Punica granatum* L.), utilizando a cv. Mollar, Celedonio (2020) concluiu que as trocas gasosas são favorecidas até a dose de 0,4 mL do bioestimulante VIUSID Agro[®], inclusive para EUA, com ganho de 10%. Já Ribeiro *et al.* (2023) testaram o bioestimulante Titan FH[®] na cultivar IAC 503 de amendoim (*Arachis hypogea* L.) e não observaram diferenças nos resultados para o sistema fotossintético. Isso sugere que cada espécie vegetal pode apresentar respostas específicas à aplicação de bioinsumos, sendo algumas mais responsivas e outras mais recalcitrantes aos estímulos promovidos por esse tipo de produto.

6.5 Produtividade e qualidade dos grãos

Não foi identificado padrão de normalidade (Shapiro-wilk, Anexo 22) para a variável produtividade (PG). Entretanto, numericamente, a lâmina com 70% de ETc produziu 43, 46 e 45% menos quando comparado às lâminas de 80, 90 e 100%, respectivamente (Figura 12). Relacionado à aplicação da Arbolina[®], a média obtida com as plantas tratadas (todas as lâminas) foi 25% maior que a observada nas plantas sem aplicação (Figura 13).

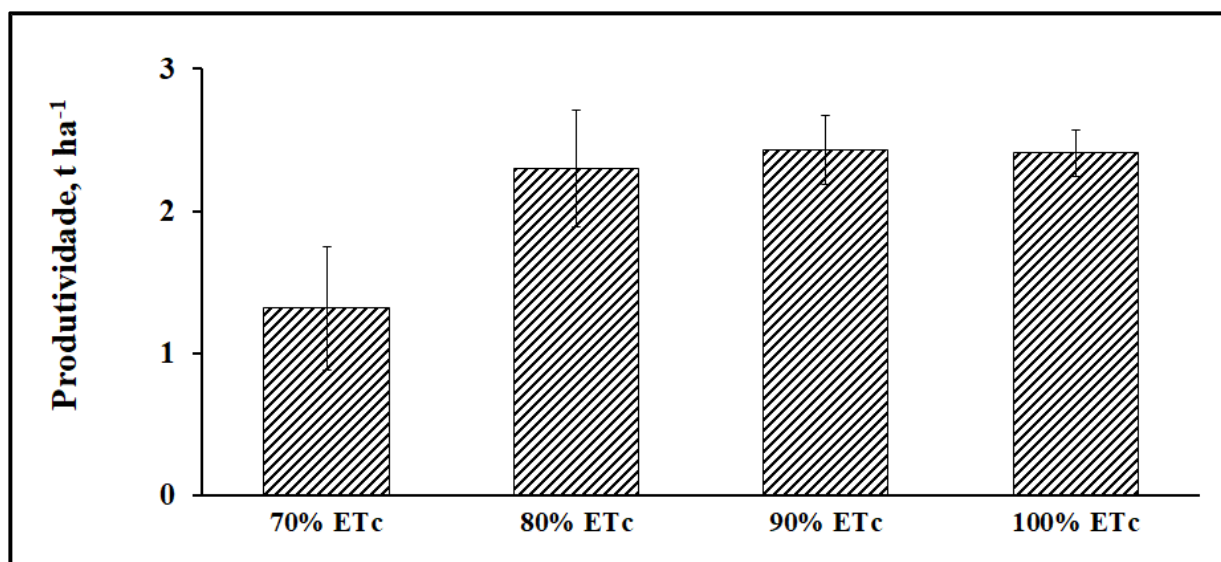


Figura 12. Produtividade de grãos em feijoeiro em função da aplicação de diferentes lâminas de irrigação (70, 80, 90 e 100% da ETc).

A tolerância das plantas ao estresse hídrico indica a capacidade de sobrevivência e preservação do seu desenvolvimento sob déficit hídrico, utilizando diferentes mecanismos para crescerem e se desenvolverem perante essa condição (Mousa; Qurashi, 2018). As respostas fisiológicas e bioquímicas observadas em plantas crescidas sob estresse hídrico variam de acordo com a espécie, cultivar, tempo de exposição, fatores edáficos, entre outros, não existindo uma única variável para que seja indicativo de tolerância a seca, por si só (Nascimento *et al.*, 2011).

As condições ambientais têm grande interferência no desenvolvimento das plantas e o déficit hídrico é um dos principais dentre os fatores que limitam a produtividade das culturas; com a ausência de quantidade adequada de água no solo, por exemplo, é possível que as atividades fisiológicas das plantas sejam afetadas, variando de acordo com a frequência, intensidade e cultivar (Farias *et al.*, 2017; Souza *et al.*, 2019). Em complemento, as atividades também são influenciadas pela luz, fotossíntese, doenças da cultura, ataque de pragas, surgimento de plantas daninhas, nível de nutrição mineral e qualidade das sementes (Mondo; Nascente, 2018).

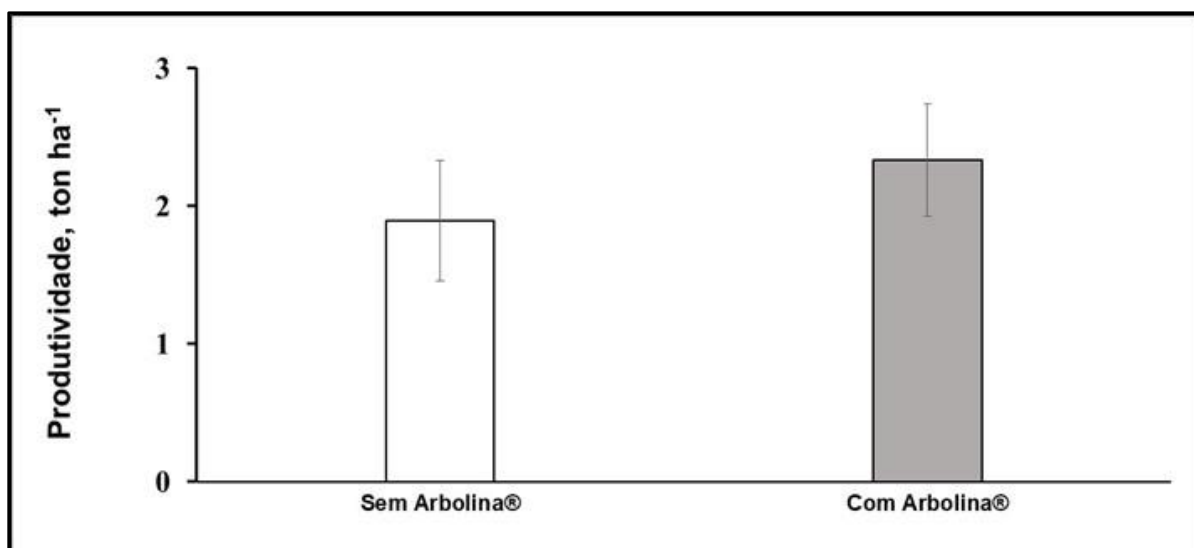


Figura 13. Produtividade em função da aplicação de Arbolina no feijoeiro.

Para peso de cem grãos (P100), observou-se diferença tanto para a aplicação Arbolina®, quanto para as diferentes lâminas (Anexos 23 e 24). Relacionado à aplicação Arbolina®, foi observado que a média de P100 nas plantas que receberam aplicação do produto foi 5% maior comparada com as plantas que não receberam (Figura 14).

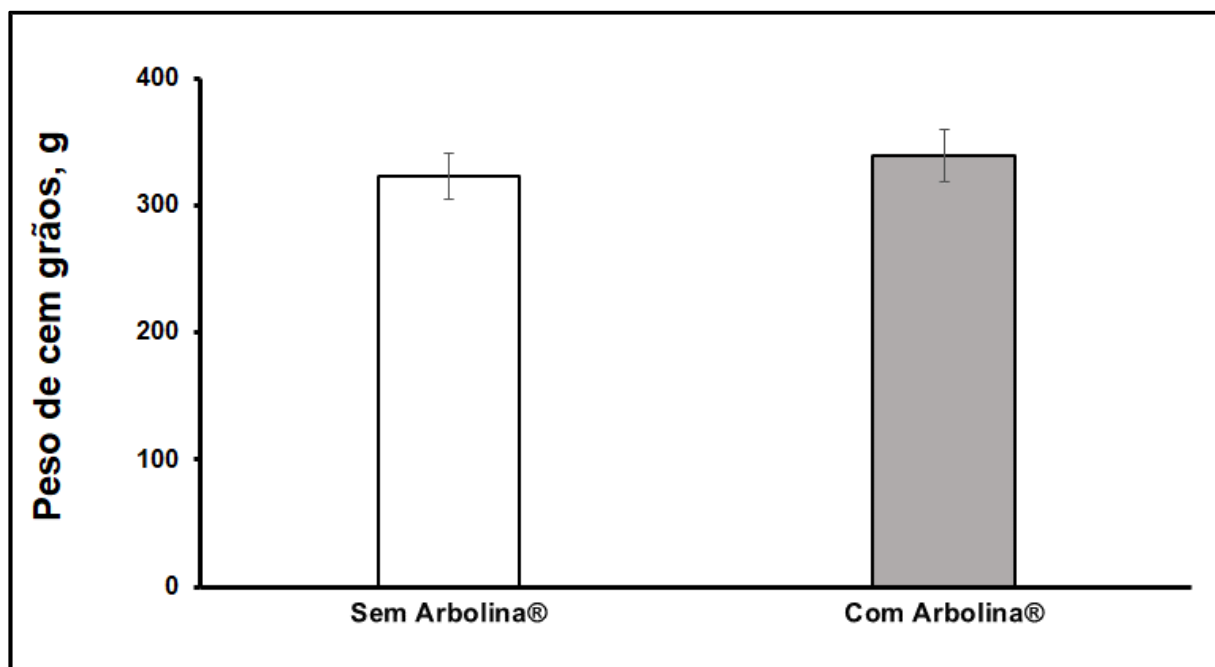


Figura 14. Peso de cem grãos em função da aplicação de Arbolina® no feijoeiro.

Resende (2022) avaliou a produtividade do feijoeiro (cultivar BRS Estilo) empregando os bioestimulantes Tilt[®], Stimulate[®], Booster[®], Fision[®] e Bioenergy[®] com extrato de alga marinha *A. Nodosum* e não observou variação no P100. Da mesma forma, Bernardo (2021), testando 5 doses de vitamina nicotinamida (0, 200, 400, 600 e 800 mg L⁻¹) em presença de Stimulate[®] (1000 mL ha⁻¹), não observou diferença no P100. Pavezi; Favarão; Korte (2017), testando Stimulate[®] (5 mL kg⁻¹), Top MR[®] (3,6 mL kg⁻¹), Nobrico Star[®] (2 mL kg⁻¹) e CropZin[®] (2 mL kg⁻¹), também não observaram variação do P100. Isso demonstra que o feijoeiro, cultivado em condições satisfatórias de água e nutrientes, apresenta-se com pouca variação do P100 quando submetido à aplicação de bioestimulantes.

A produtividade de uma cultura é altamente relacionada aos componentes de produção, como P100, por exemplo. Portanto, a utilização de tecnologias como a aplicação de bioestimulantes vegetais podem atuar na eficiência dessa variável, além de minimizar custos de produção, desde que o valor do produto seja inferior à resposta obtida pelo agricultor. Entretanto, em determinadas condições de campo, fases vegetativas da planta ou dosagem aplicada, há possibilidade desses produtos não proporcionarem incrementos significativos (Frasca *et al.*, 2020).

Em condições de estresse por deficiência de água, o feijoeiro responde com o fechamento estomático, reduzindo a fotossíntese e comprometendo o crescimento vegetativo e a área foliar, com reflexos na produtividade (Nemeskéri; Helyes, 2019). O emprego de bioestimulantes vegetais altera processos metabólicos e fisiológicos nas plantas, como por exemplo, aumentando a divisão celular e o alongamento foliar, a síntese de clorofila, a diferenciação das gemas florais, o tamanho dos frutos e a absorção de nutrientes, sendo esses fatores responsáveis por minimizar as perdas decorrentes de condições ambientais adversas, reduzindo as perdas em produtividade. (Silva *et al.*, 2016). Entretanto, não se considera regra geral a utilização desses produtos com relação direta para aumento de produtividade, pois nem

sempre geram resultados satisfatórios para os agricultores (Frasca *et al.*, 2020). Esses mesmos autores testaram bioestimulantes do feijoeiro e não observaram respostas na produtividade. É reconhecido que alguns bioestimulantes propiciam para a planta, por exemplo, melhor absorção de água e nutrientes, podendo ser uma alternativa capaz de auxiliar na superação de estresses abióticos, uma vez que atuam como incremento hormonal e nutricional. Porém, por outro lado, é fato que as respostas às aplicações são dependentes de outros fatores, como a planta cultivada e, principalmente, a composição dos produtos utilizados (Gomes, 2019; Zandonadi *et al.*, 2014).

Houve diferença para P100 em função das lâminas de irrigação (Figura 15), com o maior valor sendo observado quando as plantas receberam 100% da ETc, com produção 8% maior que a média das demais lâminas. As aplicações das lâminas 80 e 90% da ETc resultaram em aumento de 6% no P100 quando comparado com o tratamento com 70%. Oliveira (2021), avaliando o desempenho dos cultivares de feijão-comum IPR Tangará e BRS Pérola, em 4 níveis de irrigação (40, 60, 80 e 100% da capacidade do vaso), não observou diferença para o P100.

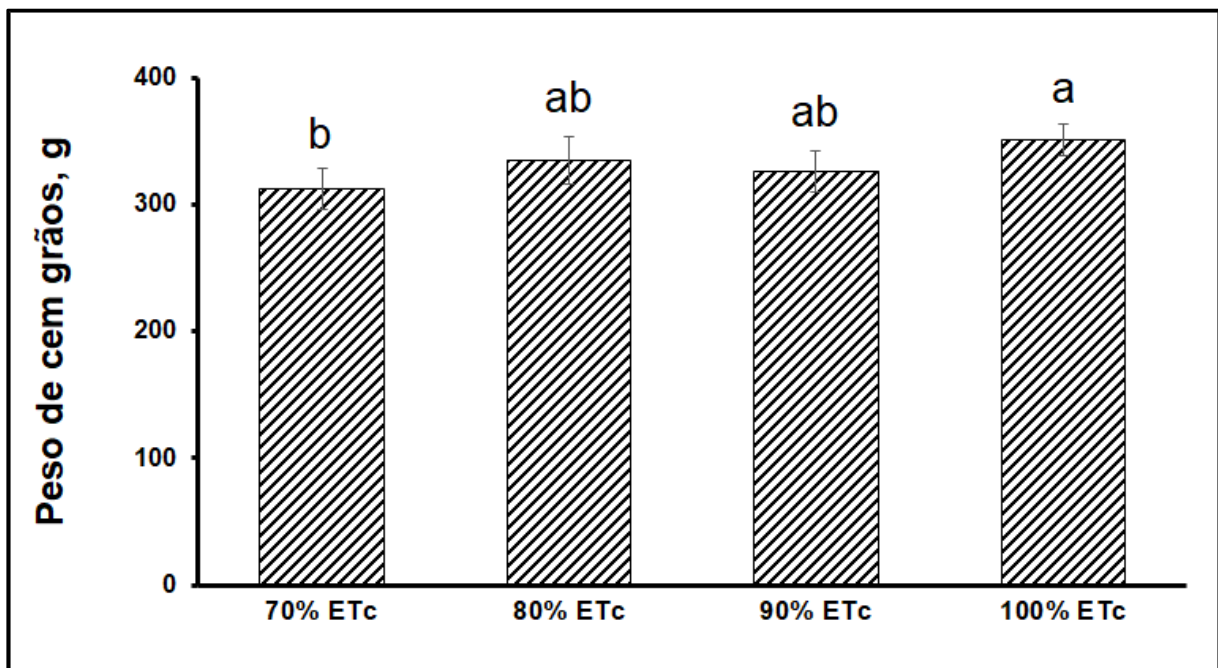


Figura 15. Peso de cem grãos em função da aplicação de diferentes lâminas de irrigação (70, 80, 90 e 100% ETc) no feijoeiro.

Silva *et al.* (2018) avaliaram a produtividade do feijão-caupi irrigado com lâminas de 75, 100, 125 e 150% ETc e uso de biofertilizante e concluíram que a aplicação da maior lâmina, sem utilização de biofertilizante, resultou na redução do valor do P100. Também investigando o desempenho de feijão-caupi sob diferentes lâminas de irrigação (50, 75, 100, 125 e 150% da ETc), Gonçalves *et al.* (2017) observaram ausência de efeito da disponibilidade de água sobre o P100. De forma semelhante, Albino *et al.* (2017) avaliaram o desenvolvimento vegetativo e rendimento de duas cultivares de feijão-caupi sob lâminas de 25, 50, 75 e 100% da ETc e não reportaram diferença delas sobre o P100.

Para a variável umidade, houve diferença somente para as lâminas de irrigação aplicadas (Anexos 25 e 26). Para elas, foi realizada a análise de regressão, conforme apresentado no Anexo 27. As plantas cultivadas com 100% da ETc apresentaram umidade 39% maiores que a média das plantas que receberam 80 e 90%, que não apresentaram diferença entre si. Plantas crescidas com 70, 80 e 90% da ETc não apresentaram diferença entre si.

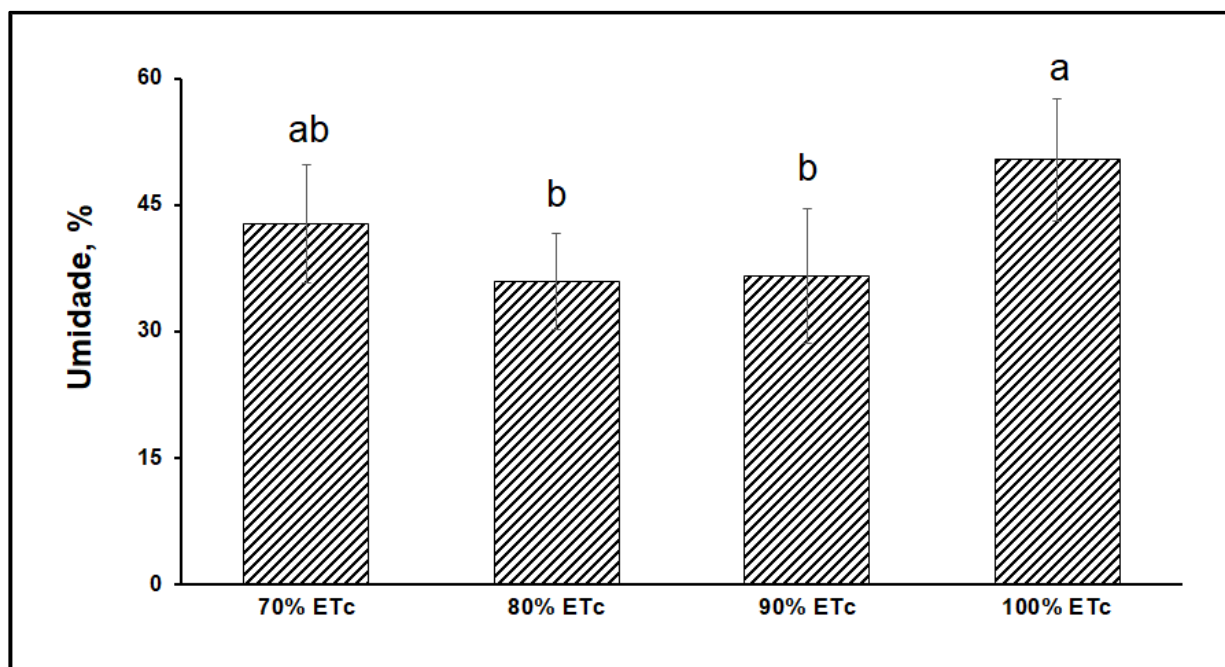


Figura 16. Umidade de grãos de feijão cultivado sob diferentes lâminas de irrigação (70, 80, 90 e 100% da ETc).

A qualidade dos grãos é um importante parâmetro para a comercialização e processamento do feijão, influenciando diretamente o valor do produto, com a massa de grãos armazenada, por exemplo, constituindo um sistema no qual a deterioração do produto estocado resulta de interações entre os fatores físicos, químicos e biológicos, dentre eles a umidade (Zambiasi, 2015). Observou-se bom ajuste dos dados obtidos empregando-se a equação quadrática ($R^{2**} = 98,84\%$), com a menor porcentagem de umidade encontrada pela aplicação da lâmina de irrigação estimada de 82,68% ETc.

Outra sugestão de conservação da umidade, relativamente à morfologia do feijão, seria perante a cutícula, pois quando desidratada, junto à alta incidência de luminosidade e baixa umidade relativa do local, caso também o solo tenha pouca umidade, essa estrutura é induzida à síntese com o aumento de sua camada lipofílica, ou seja, como mecanismo de proteção contra possível estresse hídrico, através da redução de perda de água por evaporação, é gerada uma camada de composto ceroso a mais na superfície das folhas, para que as mesmas tenham uma espécie de barreira física em prol de sua sobrevivência perante stresses abióticos (Fontana, 2021).

Não houve diferença para nenhum tratamento ou interação em relação ao teor de cinzas, lipídios, proteínas e carboidratos do feijoeiro (Figura 17) (Anexos 28 a 31).

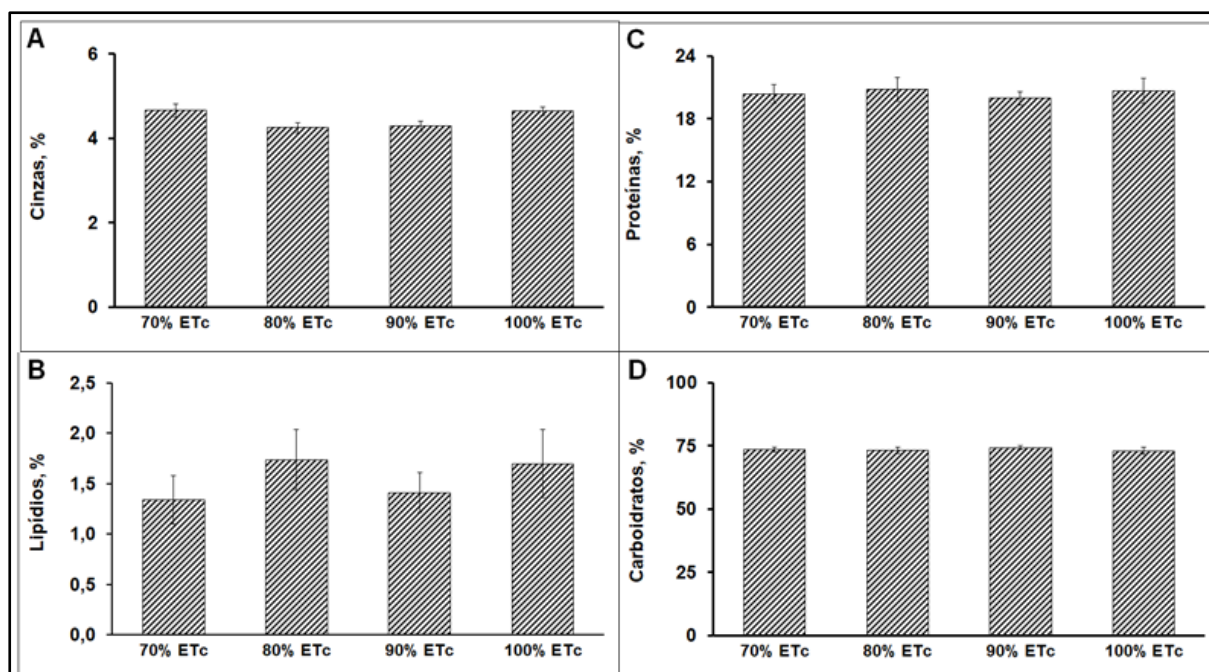


Figura 17. Teor de cinzas (A), lipídios (B), proteínas (C) e carboidratos (D) em função da aplicação de diferentes lâminas de irrigação (70, 80, 90 e 100% ETc) em feijoeiro.

O teor de cinzas nos grãos produzidos com a menor e maior lâminas aplicadas variou somente de 4,66 a 4,64%, respectivamente. O valor médio de umidade presente no feijão carioca (cru) é de 14%, e o valor médio para nutrientes é 3,5% para cinzas, 20% para proteínas, 1,30% para lipídios e 61% para carboidratos (Tabela Brasileira de Composição de Alimentos – TACO, 2011). Os teores de proteína e lipídio do feijão foram condizentes com TACO (2011), com variação de 19,97 a 20,81% e 1,32 a 1,97%, respectivamente, evidenciando os teores nutricionais que se destacaram nessa leguminosa.

Santos (2016), avaliando a produção e qualidade de feijão gurgutuba em resposta a diferentes adubações, obteve umidade, cinzas, proteínas, lipídios e carboidratos, respectivamente, na ordem de 15, 5, 17, 2 e 67%. Freitas *et al.* (2022) estudaram de forma comparativa a composição nutricional de genótipos de feijão-de-metro, tendo obtido a média respectiva de 90, 0,5, 2, 0,1 e 7% e Ronko *et al.* (2021), a fim de caracterizar fisico-quimicamente o feijão carioca, observaram umidade, cinzas, proteínas e lipídios,

respectivamente, na ordem de 12, 4, 19 e 1% (Freitas *et al.*, 2022; Ronko *et al.*, 2021; Santos, 2016).

7. CONCLUSÕES

A concentração de 217,92 mg L⁻¹ de Arbolina® foi a mais promissora em estimular o desenvolvimento vegetal inicial (17 DAS) do feijoeiro cv. BRS Radiante considerando a MSR.

A aplicação da Arbolina® aumentou a EUA em 10%, o P100 (5%), reduziu a atividade enzimática de CAT e SOD em 30 e 43%, respectivamente, quando comparado sem o seu uso e, com a média das lâminas de irrigação, aumentou a produtividade em 25%, aproximadamente 440,7 kg ha⁻¹.

As plantas que recebem lâmina de irrigação entre 86,15% e 100% da ETC produzem maiores taxas de MSR, MST, E, índice SPAD e maior atividade das enzimas SOD e APX.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AJITHKUMAR, I. P.; PANNEERSELVAM, R. ROS scavenging system, osmotic maintenance, pigment and growth status of panicum sumatrense roth under drought stress. **Cell Biochemistry and Biophysics**, v. 68, p. 587-595, 2014. <https://doi.org/10.1007/s12013-013-9746-x>.

ALBINO, G. D.; SWAROWKSY, A.; PADRÓN, R. A. R.; NOGUEIRA, C. U.; NOGUEIRA, H. M. C. de M.; RODRIGUES, G. J. Desenvolvimento vegetativo e rendimento de duas cultivares de feijão-caupi com lâminas de irrigação. **Acta Iguazu**, v. 6, n. 4, p. 83-92, 2017.

ALBRECHT, L. P.; BRACCINI, A. de L.; SCAPIM, C. A.; ÁVILA, M. R.; ALBRECHT, A. J. P.; RICCI, T. T. Manejo de biorregulador nos componentes de produção e desempenho das plantas de soja. **Bioscience Journal**, v. 27, n. 6, p. 865–876, 2011.

ALMEIDA, A. Q. de; SORATTO, R. P.; BROETTO, F.; CATANEO, A. C. Nodulação,

aspectos bioquímicos, crescimento e produtividade do feijoeiro em função da aplicação de bioestimulante. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 1, p. 77-88, 2014.

AMADOR, H. V.; IZQUIERDO, F. G.; PADRÓN, V. V. Las sustancias húmicas como bioestimulantes de plantas bajo condiciones de estrés ambiental. **Cultivos Tropicales**, v. 39, n. 4, p. 102-109, 2018.

AMERICAN OIL CHEMISTS' SOCIETY. AOCS. **AOCS Standard Procedure Am 5-04**. Rapid Determination of Oil/Fat Utilizing High Temperature Solvent Extraction. Urbana, USA, 2005.

ANJOS, D. D. N. dos; MENDES, H. T. A. e; VASCONCELOS, R. C. de; MOREIRA, P. M.; CANGUSSU, A. C. V.; PIRES, E. S. Avaliação do feijoeiro comum em função dos bioestimulantes, NPK e micronutrientes em Vitória da Conquista - BA. **Revista Agrarian**, v. 10, n. 35, p. 1-9, 2017. <https://doi.org/10.30612/agrarian.v10i35.4062>.

ANTONUCCI, G.; IMPOLLONIA, G.; CROCI, M.; POTENZA, E.; MARCONE, A.; AMADUCCI, S. Evaluating biostimulants via high-throughput field phenotyping: Biophysical traits retrieval through PROSAIL inversion. **Smart Agricultural Technology**, v. 3, p. 100067, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100067>.

ARAÚJO, B. O. N.; MONTEIRO, M. A.; MARTINS, A. C.; FONSECA, L. L.; ULIANA, A. S.; OLIVEIRA, V. D. de; PEDÓ, T.; AUMONDE, T. Z. Desempenho bioquímico de plântulas de feijão sob restrição hídrica no início do desenvolvimento. **Revista de la Facultad de Agronomía**, v. 120, n. 1, p. 1-9, 2021.

ARAÚJO, E. D. de. **Silício como atenuador do estresse hídrico em feijão-caupo por meio do mecanismo antioxidante e desempenho agrônômico**. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Universidade Estadual da Paraíba. Campina Grande, Paraíba, 102 p., 2017.

ASARGEW, M. F.; MASUTOMI, Y.; KOBAYASHI, K.; AONO, M. Water stress changes the

relationship between photosynthesis and stomatal conductance. **Science of the Total Environment**, v. 907, p. 167886-167886, 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167886>.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. AOAC. **Official methods of analysis**, Arlington, 17^a ed., v. 2, 2000 p., 2002.

ATAIDES, D. S. **Alterações na fisiologia de plantas de feijoeiro crioulos como indicadores de vulnerabilidade ao déficit hídrico e ao aumento de temperatura do ambiente de crescimento**. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade e Conservação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano. Rio Verde, Goiás, 51 p., 2018.

BAILLY, C.; BENAMAR, A.; CORBINEAU, F.; COME, D. Changes in malondialdehyde content and in superoxide dismutase, catalase and glutathione reductase activities in sunflower seeds as related to deterioration during accelerated aging. **Physiologia Plantarum**, v. 97, p. 104-110, 1996.

BARBOSA, M. R.; SILVA, M. M. de A.; WILLADINO, L.; ULISSES, C.; CAMARA, T. R. Geração e desintoxicação enzimática de espécies reativas de oxigênio em plantas. **Ciência Rural**, v. 44, n. 3, p. 453-460, 2014.

BASU, S.; ROYCHOUDHURY, A.; SAHA, P. P.; SENGUPTA, D. N. Differential antioxidative responses of indica rice cultivars to drought stress. **Plant Growth Regulation**, v. 60, n. 1, p. 51-59, 2010. <https://doi.org/10.1007/s10725-009-9418-4>.

BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, D. D.; SOARES, A. A. **Manual de irrigação**. Viçosa: Ed. UFV, 9^a ed., 545 p., 2019.

BERNARDO, V. F. **Nicotinamida e fitohormônios como bioestimulantes em feijoeiro comum**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Chapadão do Sul, Mato Grosso do Sul, 34 p., 2021.

BERTRAND, C.; GONZALEZ-COLOMA, A.; PRIGENT-COMBARET, C. Plant metabolomics to the benefit of crop protection and growth stimulation. **Advances in Botanical Research**, v. 98, p. 107–132, 2021. <https://doi.org/10.1016/bs.abr.2020.11.002>.

BETTIOL, J. V. T.; FILLA, V. A.; LEAL, F. T.; COELHO, A. P.; MEIRELLES, F. C.; LEMOS, L. B.; BOSSOLANI, J. W. Sustainable production of common beans: inoculation, co-inoculation and mineral fertili-zation in early-cycle cultivars. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 1, p. 16-28, 2020. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1822403>.

BEZERRA, V. B. F. **Análises morfofisiológicas do desenvolvimento radicular e caulinar de cultivares de *Vigna unguiculata* [L.] Walp. durante estresse hídrico**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Ceará, 41 p., 2022.

BORELLA, J.; FONTOURA, U. dos S. da.; LARRÉ, C. F.; BACARIN, M. A. Resposta diferencial ao déficit hídrico em dois cultivares de feijão comum. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 12, n. 3, 2017. <https://doi.org/10.5039/agraria.v12i3a5457>.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária – ANVISA. Resolução RDC nº 360, de 23 de dezembro de 2003. Aprova Regulamento Técnico sobre Rotulagem Nutricional de Alimentos Embalados, tornando obrigatória a rotulagem nutricional. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, 2003.

BRASIL. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. MAPA. Brasília, 2020a. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inovacao/bioinsumos/o-programa/conceitos>. Acesso em: 06 dez. 2023.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. MAPA. **Portaria nº 102, de 26 de maio de 2020**. Brasília, 2020b.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. MAPA. **Portaria nº 103, de 26 de maio de 2020**. Brasília, 2020b.

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. MAPA. **Regras para análise de sementes.** Secretaria de Defesa Agropecuária, Brasília: MAPA/ACS, 399 p., 2009.

BREUSEGEM, F.; VRANOVÁ, E.; DAT, J. F.; INZÉ, D. The role of active oxygen species in plant signal transduction. **Plant Science**, v. 161, n. 3, p. 405-414, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9452\(01\)00452-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9452(01)00452-6).

BRITO, L. P. da S.; SANTANA, F. S.; CARVALHO, G. dos S.; CHAVES, D. V. Performance of soybean plants subject to water deficit in different development stages. **Scientia Agraria Paranaensis**, p. 374-379, 2020. <https://doi.org/10.18188/sap.v19i4.25335>.

BROUGHTON, W. J.; HERNÁNDEZ, G.; BLAIR, M. W.; BEEBE, S. E.; GEPTS, P.; VANDERLEYDEN, J. Beans (*Phaseolus* spp.) - model food legumes. *Plant and Soil*, v. 252, n. 1, p. 55-128, 2003. <https://doi.org/10.1023/A:1024146710611>.

BUTRUILLE, N. M. dos S. **Influência do método de aplicação e concentrações de Arbolina na produtividade, fisiologia e qualidade de frutos de morangueiro.** Dissertação (Mestrado em Agronomia), Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília (UnB). Brasília, Distrito Federal, 78 p., 2021.

CAMPOS, A. J. de M.; SANTOS, S. M.; NACARATH, I. R. F. F. Estresse hídrico em plantas: Uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 15, 2021. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i15.23155>.

CAMPOS, T. S.; SOUSA, W. dos S.; OLIVEIRA, V. J. D. de. Uso de bioestimulantes no incremento da produtividade de grãos. **Revista Agrotecnologia**, v. 11, n. 1, p. 9-15, 2020.

CARADONIA, F.; BATTAGLIA, V.; RIGHI, L.; PASCALI, G.; LA TORRE, A. Plant biostimulant regulatory framework: Prospects in Europe and current situation at international level. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 38, p. 438-448, 2019.

<https://doi.org/10.1007/s00344-018-9853-4>.

CARDOSO, M. R. D.; MARCUZZO, F. F. N.; BARROS, J. R. Classificação climática de Koppen-Geiger para o Estado de Goiás e o Distrito Federal. **ACTA Geográfica**, v. 8, n. 16, p. 40-55, 2014. <http://dx.doi.org/10.5654/actageo2014.0004.0016>.

CARNEIRO, M. M. L. C.; DEUNER, S.; OLIVEIRA, P. V. de; TEIXEIRA, S. B.; SOUSA, C. P.; BACARIN, M. A.; MORAES, D. M. de. Atividade antioxidante e viabilidade de sementes de girassol após estresse hídrico e salino. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 33, n. 4, p. 755-764, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0101-31222011000400017>.

CARVALHO, M. H. C. de. Drought stress and reactive oxygen species. **Plant Signlaing & Behavior**, v. 3, n. 3, p. 156-165, 2008. <https://doi.org/10.4161/psb.3.3.5536>.

CAVALCANTE, I. E.; OLIVEIRA, A. P. da S.; NETO, V. E. de A.; MELO, Y. L.; FERRAZ, R. L. de S.; LACERDA, C. F. de; MELO, A. S. de. **Avanços tecnológicos em cultivo de semiaridez: Ácido salicílico e metionina na mitigação de estresse abiótico em feijão-caupi**. Desafios e Impactos das Ciências Agrárias no Brasil e no Mundo, v. 2, p. 108-116, 2021. <http://dx.doi.org/10.22533/at.ed.57921020611>.

CAVALCANTE, W. S. DA S.; SILVA, N. F. da; TEIXEIRA, M. B.; FILHO, F. R. C.; NASCIMENTO, P. E. R.; CORRÊA, F. R. Eficiência dos bioestimulantes no manejo do déficit hídrico na cultura da soja. **IRRIGA**, v. 25, n. 4, p. 754-763, 2020.

CAVERZAN, A., CASASSOLA, A., BRAMMER, S. P. Antioxidant responses of wheat plants under stress. **Genetics and Molecular Biology**, v. 39, n. 1, p. 1-6, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4685-GMB-2015-0109>.

CELEDONIO, W. F. **Bioestimulante na produção de mudas de romãzeira (*Punica granatum*) cv. Mollar**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal da Paraíba. Areia, Paraíba, 46 p., 2020.

CELMELI, T.; SARI, H.; CANCI, H.; SARI, D.; ADAK, A.; EKER, T.; TOKER, C. The nutritional content of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) landraces in comparison to modern varieties. **Agronomy, Basel**, v. 8, n. 9, p. 166, 2018. <https://doi.org/10.3390/agronomy8090166>.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos, décimo segundo levantamento, safra 2022/23, v. 10, n. 12, Brasília, DF, 2023.

CONSIDINE, M. J.; FOYER, C. H. Stress effects on the reactive oxygen species-dependent regulation of plant growth and development. **Journal of Experimental Botany**, v. 72, n. 16, p. 5795-5806, 2021. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab265>.

COSTA, V. C. **Embrapa, Universidade de Brasília e Krilltech celebram acordo de propriedade intelectual**. EMBRAPA, Brasília, 28 de jan. de 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/58974160/embrapa-universidade-de-brasilia-e-krilltech-celebram-acordo-de-propriedade-intelectual>. Acesso em: 13 nov. 2023.

D'ALESSANDRO, Marcela. UnB faz biofertilizante "do futuro". **UnBCiência**, 2019. Disponível em: <https://www.unbciencia.unb.br/exatas/36-quimica/618-unb-faz-biofertilizante-do-futuro>. Acesso em: 25 de maio de 2022.

DIAS, M. C.; OLIVEIRA, H.; COSTA, A.; SANTOS, C. Improving elms performance under drought stress: the pretreatment with abscisic acid. **Environmental and Experimental Botany**, v. 100, p. 64-73, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.12.013>.

DINIZ, N. M. **Diferentes turnos de rega aplicados ao feijoeiro de inverno sob gotejamento subsuperficial**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Uberlândia. Monte Carmelo, Minas Gerais, 65 p., 2023.

DRESSELHAUS, T.; HÜCKELHOVEN, R. Biotic and abiotic stress responses in crop plants. **Agronomy**, v. 8, n. 11, p. 267, 2018. <https://doi.org/10.3390/agronomy8110267>.

DU JARDIN, P. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. **Scientia Horticulturae**, v. 196, p. 3–14, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>.

DUMANOVIĆ, J.; NEPOVIMOVA, E.; NATIĆ, M.; KUČA, K.; JAČEVIĆ, V. The significance of reactive oxygen species and antioxidant defense system in plants: A concise overview. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 2020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.552969>.

DUTRA, W. F.; MELO, A. S. de; SUASSUNA, J. F.; MAIA, J. M.; DUTRA, A. F.; SILVA, D. C. Antioxidative responses of cowpea cultivars to water deficit and salicylic acid treatment. **Agronomy Journal**, v. 109, p. 895-905, 2017. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2015.0519>.

ENDRES, L.; SOUZA, J. L. de.; TEODORO, I.; MARROQUIM, P. M. G.; SANTOS, C. M. dos; BRITO, J. E. D. Gas exchange alteration caused by water deficit during the bean reproductive stage. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 1, p. 11-16, 2010.

FARIA, M. T. de. **Produtividade da cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigada por aspersão convencional com diferentes métodos de estimativa de lâmina de irrigação**. Tese (Doutorado em Agronomia - Ciência do Solo), Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal (SP), 84 p., 2012.

FARIA, L. C. de; PELOSO, M. J. del; COSTA, J. G. C. da; RAVA, C. A.; CARNEIRO, G. E. de S.; SOARES, D. M.; DÍAZ, J. L. C. **BRS Radiante: Nova cultivar precoce de feijoeiro comum com tipo de grão rajado**. **Comunicado Técnico 45**, Embrapa Arroz e Feijão, 2 p., 2002.

FARIAS, V. D. da S.; LIMA, M. J. A. de; NUNES, H. G. G. C.; SOUSA, D. de P.; SOUZA, P. J. de O. P. de S. Water demand, crop coefficient and uncoupling factor of cowpea in the eastern amazon. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 1, p. 190-200, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252017v30n121rc>.

FERREIRA, D. F. **SisVar®: Sistema de análise de variância para dados balanceados.** Software estatístico (versão 4.1), DEX/ UFLA, Lavras, 2011.

FERREIRA, M. H.; NOBRE, D. A. C.; MACEDO, W. R. Biorreguladores em feijoeiro cultivado sob dois regimes hídricos. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 19, n. 1, p. 54-63, 2020. <https://doi.org/10.5965/223811711912020054>.

FILHO, R. C. J. **Ácido salicílico e prolina como indutores de tolerância a estresse hídrico em feijão-caupi.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual da Paraíba/Embrapa Algodão. Campina Grande, Paraíba, 52 p., 2019.

FONTANA, N. **Efeitos da deriva simulada de 2,4-D sobre feijão, soja, tomateiro e videira.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, Paraná, 38 p., 2021.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION STATISTICS. **FAOSTAT** Database. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Production quantities of beans (dry), 2024. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>. Acesso em 22 jan. 2024.

FRANÇOIS, T. **Relações hídricas e trocas gasosas em plantas de feijão submetidas à irrigação deficitária.** Dissertação (Mestrado em Biodiversidade e Conservação) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, Rio Grande do Sul, 113p., 2012.

FRASCA, L. L. de M.; NASCENTE, A. S.; LANNA, A. C.; CARVALHO, M. C. S.; COSTA, C. G. Bioestimulantes no crescimento vegetal e desempenho agrônômico do feijão-comum de ciclo superprecoce. **Revista Agrarian**, v. 13, n. 47, p. 27-41, 2020. <https://doi.org/10.30612/agrarian.v13i47.8571>.

FREITAS, A. F. de; MATTIETTO, R. de A.; FREITAS, S. C. de; FILHO, F. R. F. Estudo comparativo da composição nutricional de genótipos de feijão-de-metro. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 159**, Embrapa Amazônia Oriental, Belém (PA), 23 p., 2022.

GALVÃO I. M.; SANTOS O. F.; SOUZA M. L. C.; GUIMARÃES J. J.; KÜHN I. E.; BROETTO, F. Biostimulants action in common bean crop submitted to water déficit. **Agricultural Water Management**, n. 225, p. 1-6, 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105762>.

GAMA, G. F. V. **Fenotipagem de genótipos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) e mecanismos de tolerância ao déficit hídrico na fase de germinação**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais, 82 p., 2023.

GHANNOUM, O.; CONROY, J. P.; DRISCOLL, S. P.; PAUL, M. J.; FOYER, C. H.; LAWLOR, D. W. Nonstomatal limitations are responsible for drought-induced photosynthetic inhibition in four C4 grasses. **New Phytologist**, v. 159, n. 3, p. 599-608, 2003. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00835.x>.

GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 48, p. 909-930, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>.

GIRALDO, J. P.; WU, H.; NEWKIRK, G. M.; KRUSS, S. Nanobiotechnology approaches for engineering smart plant sensors. **Nature nanotechnology**, v. 14, n. 6, p. 541-553, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0470-6>.

GOEL, A.; SHEORAN, I. S. Lipid peroxidation and peroxide-scavenging enzymes in cotton seeds under natural ageing. **Biologia Plantarum**, v. 46, n. 3, p. 429-434, 2003.

GOMES, J. C.; SILVA, C. O. da.; COSTA, N. M. B.; PIROZI, M. R. Desenvolvimento e caracterização de farinhas de feijão. **Revista Ceres**, v. 53, n. 309, p. 548-558, 2006.

GOMES, L. P. **Bioestimulantes e seus efeitos nos componentes da produção, nas trocas gasosas e na eficiência de uso da água no tomateiro sob restrição hídrica**. Dissertação

(Mestrado em Olericultura) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano. Morrinhos, Goiás, 46 p., 2019.

GONÇALVES, I. S.; SILVA, R. R. da; OLIVEIRA, G. M. de; SANTIAGO, E. J. P.; OLIVEIRA, V. E. A. de. Características fisiológicas e componentes de produção de feijão caupi sob diferentes lâminas de irrigação. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 2, n. 3, p. 320-329, 2017. <http://dx.doi.org/10.24221/jeap.2.3.2017.1456.320-329>.

GORYACHEVA, I. Y.; SAPELKIN, A. V.; SUKHORUKOV, G. B. Carbon nanodots: Mechanisms of photoluminescence and principles of application. **Trends in Analytical Chemistry**, v. 90, p. 27-37, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trac.2017.02.012>.

GUERRA, A. F.; RODRIGUES, G. C.; ROCHA, O. C.; EVANGELISTA, W. Necessidade hídrica no cultivo de feijão, trigo, milho e arroz sob irrigação no bioma Cerrado. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 100**, Embrapa Cerrados, Planaltina (DF), 15 p., 2003.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. **American Society of Agricultural and Biological Engineers Meeting**, p. 85-2517, Chicago, 1985.

HASANUZZAMAN, M.; BHUYAN, M.H.M.; ZULFIQAR, F.; RAZA, A.; MOHSIN, S.M.; MAHMUD, J.A.; FUJITA, M.; FOTOPOULOS, V. Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator. **Antioxidants**, v. 9, n. 8, p. 681, 2020. <https://doi.org/10.3390/antiox9080681>.

HAVIR, E.; MCHALE, N. A. A regulation of catalase activity in leaves of *Nicotiana sylvestris* by high CO₂. **Plant Physiology**, v. 89, n. 3, p. 952-957, 1989. <https://doi.org/10.1104%2Fpp.89.3.952>.

HERNANDEZ-SANTANA, V.; RODRIGUEZ-DOMINGUEZ, C. M.; FERNÁNDEZ, E.; DIAZ-ESPEJO, A. Role of leaf hydraulic conductance in the regulation of stomatal

conductance in almond and olive in response to water stress. **Tree Physiology**, v. 36, n. 6, p. 725-735, 2016. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv146>.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. The water-culture method for growing plants without soil. **California Agricultural Experimental Station Circular**, v. 347, 1950.

HOSSAIN, M. A.; LI, Z.; HOQUE, T. S.; BURRITT, D. J.; FUJITA, M.; MUNNÉ-BOSCH, S. Heat or cold priming-induced cross-tolerance to abiotic stresses in plants: key regulators and possible mechanisms. **Protoplasma**, v. 255, n. 1, p. 399-412, 2017. <http://dx.doi.org/10.1007/s00709-017-1150-8>.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. IAL. **Métodos Físico-Químicos para Análise de Alimentos**. Ministério da Saúde, São Paulo, p. 1020, 2008.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. ISO. **ISO 21527-1: 2008**. Microbiology of food and animal feeding stuffs - Horizontal method for the enumeration of yeast and moulds - Part 2: Colony count technique in products with water activity less than or equal to 0, 95. Genebra, Suíça, 2008.

JALEEL, J. A.; PRAMOD, K. Artful and multifaceted applications of carbon dot in biomedicine. **Journal of Controlled Release**, [S. l.], v. 269, p. 302–321, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2017.11.027>.

JUÁREZ-MALDONADO, A., ORTEGA-ORTÍZ, H., MORALES-DÍAZ, A. B., GONZÁLEZ-MORALES, S., MORELOS-MORENO, Á., FUENTE, M. C-D. la.; SANDOVAL-RANGEL, A., CADENAS-PLIEGO, G.; BENAVIDES-MENDOZA, A. **Nanoparticles and Nanomaterials as Plant Biostimulants**. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 20, n. 1, p. 162, 2019. <https://doi.org/10.3390/ijms20010162>.

JÚNIOR, S. de O. M. **Tolerância de cultivares de cana-de-açúcar ao déficit hídrico: Relações hídricas, trocas gasosas, fluorescência da clorofila e metabolismo antioxidante.**

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, Alagoas, 165 p., 2017.

JÚNIOR, S. G. J.; MORAES, J. G. L.; SILVA, F. D. B. da; SILVA, B. do N.; SOUSA, G. G. de; OLIVEIRA, L. L. B. de; MESQUITA, R. O. Respostas fisiológicas de genótipo de fava (*Phaseolus lunatus* L.) submetidas ao estresse hídrico cultivadas no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 3, p. 413-422, 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786343047>.

KACIENĖ, G.; ŽALTAUSKAITĖ J.; MILČĚ, E.; JUKNYS, R. Role of oxidative stress on growth responses of spring barley exposed to different environmental stressors. **Journal of Plant Ecology**, v. 8, n. 6, 2015. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtv026>.

KAPPES, C.; WRUCK, F. J.; CARVALHO, M. A. C. de; YAMASHITA, O. M. Feijão comum: Características morfo-agronômicas de cultivares. In: Congresso Nacional de Pesquisa de Feijão, 9., Campinas. **Ciência e Tecnologia na Cadeia Produtiva do Feijão**. Documentos, Campinas: Instituto Agronômico, 85, 2008.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 17, n. 4, p. 678-684, 1974.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara. Koogan, 452 p., 2004.

KUMAR, S.; KUMAR, P. Role of biofertilizers in alleviation of abiotic stress: A review. **Progressive Agriculture**, v. 21, n. 2, 2021. <http://doi.org/10.5958/0976-4615.2021.00047.8>.

LAKHDAR, A.; TRIGUI, M.; MONTEMURRO, F. An overview of biostimulants' effects in saline soils. **Agronomy**, v. 13, n. 8, p. 2092, 2023. <https://doi.org/10.3390/agronomy13082092>.

LEMOINE, R.; CAMERA, S. L.; ATANASSOVA, R.; DÉDALDÉCHAMPF.; ALLARIO, T.; POURTAU, N.; BONNEMAIN, J.; LALOI, M.; COUTOS-THÉVENOT, P.; MAUROUSSET,

L. FAUCHER, M.; GIROUSSE, C.; LEMONNIER, P.; PARRILLA, J.; DURAND, M. Source-to-sink transport of sugar and regulation by environmental factors. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, n. 272, 2013. <http://doi.10.3389/fpls.2013.00272>.

LEMOS, J. C. L. de. **Concentrações de Arbolina no desenvolvimento do alface (*Lactuca sativa* L.) baby**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília. Brasília, Distrito Federal, 39 p., 2021.

LI, Y. J.; HAI, R. L.; DU, X. H.; JIANG, X. N.; LU, H. Over-expression of a Populus peroxisomal ascorbate peroxidase (APX) gene in tobacco plants enhances stress tolerance. *Plant Breeding*, v. 128, n. 4, p. 404-410, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.2008.01593.x>.

LI, Y.; LI, W.; ZHANG, H.; DONG, R.; LI, D.; LIU, Y.; HUANG, L.; LEI, B. Biomimetic preparation of silicon quantum dots and their phytophysiology effect on cucumber seedlings. **Journal of Materials Chemistry B**, v. 7, n. 7, p. 1107-1115, 2019. <https://doi.org/10.1039/C8TB02981D>.

LI, Y.; XU, X.; WU, Y.; ZHUANG, J.; ZHANG, X.; ZHANG, H.; LEI, B.; HU, C.; LIU, Y. A review on the effects of carbon dots in plant systems. **Materials Chemistry Frontiers**, v. 4, n. 2, p. 437–448, 2020. <https://doi.org/10.1039/c9qm00614a>.

LIMA, R. F. de; APARECIDO, L. E. de O. CARACTERIZAÇÃO climática e sua influência na biodiversidade da região centro-oeste do Brasil. **Encontro Internacional de Gestão, Desenvolvimento e Inovação**, v. 4, n. 1, 21 p., 2020.

LIU, H.; YE, T.; MAO, C. Fluorescent carbon nanoparticles derived from candle soot. **Angewandte Chemie**, v. 46, n. 34, 2007. <http://dx.doi.org/10.1002/anie.200701271>.

LOPES, L. S. **Bioreguladores vegetais em plantas de feijoeiro**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa. Rio Paranaíba, Minas Gerais, 19 p., 2017.

LÓPEZ, C. M.; PINEDA, M.; ALAMILLO, J. M. Differential regulation of drought responses

in two *Phaseolus vulgaris* genotypes. **Plants**, v. 9, n. 12, p. 1815, 2020.
<https://doi.org/10.3390/plants9121815>.

LUCENA, R. A. M. **Prospecção de genótipos de feijão-caupi resilientes à seca no Cariri Ocidental Paraibano**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Campina Grande. Sumé, Paraíba, 32 p., 2023.

MARENCO, R. A.; LOPES, N. F. **Fisiologia vegetal: Fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral**. Universidade Federal de Viçosa (MG), 451 p., 2005.

MARQUEZI, M.; GERVIN, V. M.; WATANABE, L. B.; BASSINELLO, P. Z.; AMANTE, E. R. Physical and chemical properties of starch and flour from different common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 19, 2016.
<https://doi.org/10.1590/1981-6723.0516>.

MELO, A. S. de.; SILVA, A. R. F. da; DUTRA, A. F.; DUTRA, W. F.; SÁ, F. V. da S.; ROCHA, M. de M. Crescimento e pigmentos cloroplastídicos de genótipos de feijão *Vigna* sob déficit hídrico. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, n. 3, p. 2579-2591, 2018.
<http://10.7127/rbai.v12n300698>.

MELO, C. O. de.; SILVA, G. H. da.; ESPERANCINI, M. S. T. Casualidade de preços do feijão de cor no Paraná. **Revista de Política Agrícola**, v. 25, n. 2, p. 5-13, 2016.

MENDES, C. R. L. G. **Efeito de bioestimulantes no desenvolvimento inicial de soja sob deficiência hídrica**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Botucatu, São Paulo, 80 p., 2019.

MITTLER, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. **Trends in Plant in Science**, v. 9, p. 405-410, 2002. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(02\)02312-9](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(02)02312-9).

MONDO, V. H. V.; NASCENTE, A. S. Produtividade do feijão-comum afetado por população de plantas. **Revista Agrarian**, v. 11, n. 39, p. 89-94, 2018. <https://doi.org/10.30612/agrarian.v11i39.4569>.

MOUSA, M. A.; AL QURASHI, D. Growth and yield of cowpea (*Vigna unguiculata* L.) cultivars under water deficit at different growth stages. **Legume Research**, v. 41, n. 5, p. 702-709, 2018. <https://doi.org/10.18805/LR-384>.

NAKANO, Y.; ASADA, K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplast. **Plant Cell Physiology**, v. 22, p. 867-880, 1981. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a076232>.

NASCIMENTO, S. P. do; BASTOS, E. A.; ARAÚJO, E. C.; FREIRE FILHO, F. R.; SILVA, E. M. D. Tolerância ao déficit hídrico em genótipos de feijão-caupi. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 8, p. 853-860, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000800013>.

NEMESKÉRI, E.; HELYES, L. Physiological responses of selected plant species to water stress. **Agronomy**, v. 9, n. 8, p. 447, 2019. <https://doi.org/10.3390/agronomy9080447>.

NETO, V. E. de A.; OLIVEIRA, A. P. da S.; CAVALCANTE, I. E.; MELO, Y. L. MELO, A. S. de M. Capítulo 33: Ácido Salicílico e Metionina Promovem Manutenção do Status Hídrico pelo Ajustamento Osmótico em Feijão-Caupi "BRS-NOVAERA". **Perspectivas das Ciências Agrárias na Sociedade de 5.0: Educação, Ciência, Tecnologia e Amor**, p. 315-321, 2020. <http://dx.doi.org/10.31692/978-65-88970-07-2>.

NIMER, E. Climatologia do Brasil. **IBGE** – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, Rio de Janeiro, 422 p., 2ª ed., 1989.

NIMER, E. Ensaio de um novo método de classificação climática: contribuição à climatologia intertropical e subtropical, especialmente do Brasil. **Boletim de Geografia**, Rio de Janeiro, v.

31, n. 277, p. 141-153, 1972.

NOCTOR, G.; FOYER, C. H. Redox homeostasis and antioxidant signaling: a metabolic interface between stress perception and physiological responses. **The Plant Cell**, v. 17, n. 7, p. 1866-1875, 2005. <https://doi.org/10.1105/tpc.105.033589>.

OLIVEIRA, A. D. de; FERNANDES, E. J.; RODRIGUES, T. de J. D. Condutância estomática como indicador de estresse hídrico em feijão. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 1, p. 86–95, 2005.

OLIVEIRA, A. P. da S. Ácido salicílico e metionina mitigam os efeitos deletérios da restrição hídrica em feijão-caupi. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual da Paraíba/Embrapa Algodão. Campina Grande, Paraíba, 70 p., 2020.

OLIVEIRA, F. de A. de; OLIVEIRA, M. K. T. de; LIMA, L. A.; ALVES, R. de C.; RÉGIS, L. R. de L.; SANTOS, S. T. dos. Estresse salino e biorregulador vegetal em feijão caupi. **Irriga**, v. 22, n. 2, p. 314-329, 2017. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2017v22n2p314-329>.

OLIVEIRA, L. M. **Cultivares de feijão-comum sob déficit hídrico, estresse salino e adubações**. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia. Vitória da Conquista, Bahia, 99 p., 2021.

OLIVEIRA, M. A. J. D.; BOVI, M. L. A.; MACHADO, E. C.; GOMES, M. M. D. A.; HABERMANN, G.; RODRIGUES, J. D. Fotossíntese, condutância estomática e transpiração em pupunheira sob deficiência hídrica. **Scientia Agricola**, p. 59-63, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162002000100008>.

OLIVEIRA, M. G. de C.; OLIVEIRA, L. F. C. de; WENDLAND, A.; GUIMARÃES, C. M.; QUINTELA, E. D.; BARBOSA, F. R.; CARVALHO, M. da C. S.; LOBO JUNIOR, M.; SILVEIRA, P. M. da. Conhecendo a fenologia do feijoeiro e seus aspectos fitotécnicos. **Embrapa Arroz e Feijão**, 2^a ed., 59 p., 2018.

ORGANIZATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT/ FOOD

AND AGRICULTURAL ORGANIZATION. OECD-FAO. **OECD-FAO Agricultural Outlook 2023-2032**, OECD Publishing, Paris, 90 p., 2023. <https://doi.org/10.1787/08801ab7-en>.

PAFFARO, L. F. **Ação de estimulantes vegetais na produtividade de alguns cultivos tropicais**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo. Piracicaba, São Paulo, 69 p., 2017.

PANDEY, P.; SRIVASTAVA, R. K.; RAJPOOT, R.; RANI, A.; PANDEY, A. K.; DUBEY, R. S. Water deficit and aluminum interactive effects on generation of reactive oxygen species and responses of antioxidative enzymes in the seedlings of two rice cultivars differing in stress tolerance. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 2, p. 1516-1528, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5392-8>.

PAVEZI, A.; FAVARÃO, S. C. M.; KORTE, K. P. Efeitos de diferentes bioestimulantes na cultura do feijoeiro-comum. **Revista Ciências Exatas e da Terra e Ciências Agrárias**, v. 12, n. 1, p. 30-35, 2017.

PEIXOTO, P. H. P.; CAMBRAIA, J.; SANT'ANNA, R.; MOSQUIN, P. R.; MOREIRA, M. A. Aluminium effects on lipid peroxidation and on the activities of enzymes of oxidative metabolism in sorghum. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 11, n. 3, p. 137-143, 1999.

PEREIRA, A. C. V. Z. **Análise da diversidade genética e da expressão de genes candidatos para tolerância ao déficit hídrico no grupo Carioca (*Phaseolus vulgaris* L.), relacionados ao desenvolvimento do sistema radicular**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo. Piracicaba, São Paulo, 92 p., 2019.

RAMOS, A. R. P. **Produtos de efeitos fisiológicos no desenvolvimento de plantas de tomate ‘giuliana’, na produção e pós-colheita de frutos.** Tese (Doutorado em Agronomia/Horticultura) – Universidade Estadual Paulista. Botucatu, São Paulo, 147 p., 2013.

RÊGO, L. V. C. do; MATA, M. E. R. M. C. Physical-chemical composition of bean accesses *Phaseolus vulgaris* L. produced in the Brazilian Semiarid. **Concilium**, v. 24, n. 4, 2024. <https://doi.org/10.53660/CLM-2892-24C57>.

REIS, L. C. **Déficit hídrico e ácido abscísico no crescimento, metabolismo fotossintético e antioxidante em mudas de *Calophyllum brasiliense* Cambess.** Dissertação (Mestrado em Agronomia/Produção Vegetal) – da Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2018. 71 p.

REIS, M. A. M. dos. **Bioestimulante como estratégia ao déficit hídrico em feijoeiro comum.** Tese (Doutorado em Agronomia - Ciência do Solo), Universidade Estadual Paulista (UNESP), Jaboticabal, São Paulo, 61 p., 2021.

RESENDE, L. P. **Influência de bioestimulantes e reguladores de crescimento na produtividade do feijoeiro comum.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, Minas Gerais, 36 p., 2022.

RIBEIRO, N. D.; LONDERO, P. M. G.; CARGNELUTTI FILHO, A.; JOST, E. POERSCH, N. L.; MALLMANN, C. A. Composição de aminoácidos de cultivares de feijão e aplicações para o melhoramento genético. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 10, p. 1393–1399, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007001000004>.

RIBEIRO, R. M. R.; SOUSA, G. G. de; BARBOSA, A. S.; LACERDA, C. F. de; FREIRE, M. H. da C.; MORAES, J. G. L. Irrigation strategies with saline water and phosphate fertilization in cowpea culture. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 17, n. 3, 2022. <https://doi.org/10.5039/agraria.v17i3a2572>.

RIBEIRO, V. F.; ANDRADE, C. L. L. de; FILHO, F. R. C.; VIEIRA, G. H. de O. V.; LEÃO, K. R. FERREIRA, T. M.; TEIXEIRA, M. B. Características morfofisiológicas e de produtividade na cultura de amendoim em resposta a aplicação de bioestimulante. **Brazilian Journal of Science**, v. 2, n. 2, p. 98-108, 2023.

RICHARDSON, A. D.; AIKENS, M.; BERLYN, G. P.; MARSHALL, P. Drought stress and paper birch (*Betula papyrifera*) seedlings: effects of an organic bioestimulant on plant health and stress tolerance, and detection of stress effects with instrument-based, noninvasive methods. **Journal of Arboriculture**. v. 30, n.1, p. 52-61, 2004. <http://dx.doi.org/10.48044/jauf.2004.007>.

RIZZINI, C. T. Tratado de fitogeografia do Brasil: aspectos ecológicos, sociológicos e florísticos. **Âmbito Cultural Edições**, 2ª ed., Rio de Janeiro, 1997.

RODRIGUES, C. L. C. **Uso de bioestimulante em sementes de feijão caupi**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Instituto Federal do Sertão Pernambucano. Petrolina, Pernambuco, 21 p., 2017.

RODRIGUES, J. D. **Caracterização de cultivares de algodão tolerantes ao estresse hídrico baseada em variáveis de crescimento e na atividade das enzimas antioxidativas**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, Pernambuco, 48 p., 2016.

RODRIGUES, J. da S. **Influência da Arbolina (carbon dots) no crescimento de alface (*Lactuca sativa* L.) cultivado em sistema hidropônico**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília. Brasília, Distrito Federal, 39 p., 2023.

RONKO, L. Z.; CHEZINI, A.; LOS, F. G. B.; DEMIATE, I. M. Caracterização físico-química de feijão carioca (*Phaseolus vulgaris* L.) e das propriedades tecnológicas de sua fração amido.

Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial, v. 15, n. 1, p. 3534-3555, 2021.
<http://dx.doi.org/10.3895/rbta.v15n1.12699>.

ROSA, V. do R. **Ação de bioestimulantes na mitigação do estresse por deficiência hídrica em soja**. Tese (Doutorado)- Universidade Estadual Paulista (Unesp). Botucatu, São Paulo, 101 p., 2020.

ROUPHAEL, Y.; COLLA, G. Editorial: Biostimulants in agriculture. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 40, 2020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00040>.

SAATH, K. C. de O.; FACHINELLO, A. L. Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 56, n. 2, p. 195, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/1234-56781806-94790560201>.

SALES, C. R. G.; RIBEIRO, R. V.; SILVEIRA, J. A. G.; MACHADO, E. C.; MARTINS, M. O.; LAGÔA, A. M. M. A. Superoxide dismutase and ascorbate peroxidase improve the temperature. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 73, p. 326-336, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.10.012>.

SANTOS, E. M. dos. **Produção e qualidade da variedade local de feijão gurgutuba em resposta a diferentes adubações**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba. Bananeiras, Paraíba, 104 p., 2016.

SANTOS, G. N. de L. M.; LUZIA, D. M. M.; FARIAS, V. L. da S. F. Composição centesimal e atividade antioxidante de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Interfaces**, n. 10, 2023. <https://zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.8165128>.

SANTOS, J. P.; BORGES, T. S.; SILVA, N. T.; ALCANTRA, E.; REZENDE, R. M.; FREITAS, A. S. de. Efeito de bioestimulante no desenvolvimento do feijoeiro. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 15, n. 1, p. 815-824, 2017.

SANTOS, J. P.; BORGES, T. S.; SILVA, N. T.; ALCANTRA, E.; REZENDE, R. M.;

FREITAS, A. S. de. Efeito de bioestimulante no desenvolvimento do feijoeiro. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 15, n. 1, p. 815-824, 2017.

SANTOS, R. M. **Resposta produtiva do feijão carioca (*Phaseolus vulgaris* L. TAA DAMA.) sob déficit hídrico em diferentes fases fenológicas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Botucatu, São Paulo, 78 p., 2021.

SCANDALIOS, J. G. Oxygen stress and superoxide dismutases. **Plant Physiology**, v. 101, p. 7-12, 1993. <https://doi.org/10.1104%2Fpp.101.1.7>.

SEKMEN, A. H.; OZGUR, R.; UZILDAY, B.; TURKAN, I. Reactive oxygen species scavenging capacities of cotton (*Gossypium hirsutum*) cultivars under combined drought and heat induced oxidative stress. **Environmental and Experimental Botany**, v. 99, p. 141-149, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.11.010>.

SERAGLIO, J.; GONÇALVES, J. P. Z.; PEREIRA, R. A história da nanotecnologia: principais acontecimentos na busca da manipulação da matéria em nível subatômico. In: PEREIRA, R.; WINCKLER, S.; TEIXEIRA, M. M. (Eds.). **Cidadania e Controle Social na Governança da Nanotecnologia**, p. 126, 2016.

SHARMA, P.; JHA, A. B.; DUBEY, R. S.; PESSARAKLI, M. Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. **Journal of Botany**, p. 1-26, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/217037>.

SIDDIQUI, M. H., AL-KHAISHANY, N. Y.; AL-QUTAMI, M. A.; AL-WHAIBI, M. H.; GROVER, A.; ALI, H. M.; AL-WAHIBI, M. S.; BUKHARI, N. A. Response of different genotypes of faba bean plant to drought stress. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 16, n. 5, p. 10214-10227, 2015. <https://doi.org/10.3390/ijms160510214>.

SILVA, A. V.; FILHO, J. F. S.; SILVA, M. C. T.; VAZ, N. C. A.; SILVA, M. L. G.

Edaphoclimatic aptitude and agricultural production environments of the bean culture. **Scientific Electronic Archives**, v. 13, n. 10, p. 102–112, 2020. <https://doi.org/10.36560/131020201114>.

SILVA, E. C. B. da; LIMA, J. R. de S.; ANTONINO, A. C. D.; MELO, A. A. S. de; SOUZA, E. S. de; SOUZA, R. M. S.; SILVA, V. P. da.; OLIVEIRA, C. L. de. Efeito da irrigação suplementar na produtividade e eficiência no uso de água da plama forrageira. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 6, p. 2744-2759, 2020.

SILVA, F. C. da. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Embrapa Informação Tecnológica, 2ª ed., 627 p., 2009.

SILVA, J. C. da; BARROS, V. D. S.; MARTINS, F. F.; COSTA, L. F. F.; SILVA, S. M. S.; SILVA, M. H. P. M. Uniformidade de distribuição de água em um sistema de irrigação por gotejamento. IV INOVAGRI Internation Meeting, p. 1-7, 2017.

SILVA, K. I.; SALES, C. R. G.; MARCHIORI, P. E. R.; SILVEIRA, N. M.; MACHADO, E. C.; RIBEIRO, R. V. Short-term physiological changes in roots and leaves of sugarcane varieties exposed to H₂O₂ in root medium. **Journal of Plant Physiology**, v. 177, n. 1, p. 93-99, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2015.01.009>.

SILVA, L. M.; MATA, M. E. R. M. C.; DUARTE, M. E. M. Teor de água limite para crioconservação de sementes de romã (*Punica granatum* L.). **Engenharia Agrícola**, v. 35, p. 313-321, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n2p313-321/2015>.

SILVA, M. de A.; ROSA, V. do R.; SANTOS, A. L. F. dos; SILVA, A. A. da; SAB, M. P. V.; CARDOSO, F. B.; MARIN, M. A. Enhanced tolerance to cold in commom bean treated with biostimulant. **Gesunde Pflanzen**, v. 73, n. 1, p. 39-50, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10343-020-00526-2>.

SILVA, R. S.; FOGAÇA, J. J. N. L.; MOREIRA, E. S.; PRADO, T. R.; VASCONCELOS, R. C. Morfologia e produção de feijão comum em função da aplicação de bioestimulantes. **Revista Scientia Plena**, v. 12, n. 10, 2016. <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2016.100201>.

SILVA, W. C.; MOURA, J. G. de; VIANA, I. E. T.; NOGUEIRA, A. L. da S. P.; SILVA, T. M.; OLIVEIRA, A. B. de. Produtividade de feijão-caupi submetido a diferentes lâminas de irrigação com uso de biofertilizante. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, n. 6, p. 3028-3039, 2018. <https://doi.org/10.7127/rbai.v12n600914>.

SILVA, W. C.; MOURA, J. G. de; VIANA, I. E. T.; NOGUEIRA, A. L. da S. P.; SILVA, T. M. da; OLIVEIRA, A. B. de. Produtividade de feijão-caupi submetido a diferentes lâminas de irrigação com uso de biofertilizante. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, n. 6, p. 3028–3039, 2018. <http://dx.doi.org/10.7127/rbai.v12n600914>.

SINGH, S. P.; GUTIÉRREZ, A. J.; MOLINA, A.; URREA, C.; GEPTS, P. Genetic diversity in cultivated common bean: II. Marker-based analysis of morphological and agronomic traits. **Crop Sciences**, v. 31, p. 23-29, 1991. <https://doi.org/10.2135/cropsci1991.0011183X003100010005x>.

SORATTO, R. P.; ARF, O.; RODRIGUES, R. A. F.; BUZETTI, S.; SILVA, T. R. B. da. Resposta do feijoeiro ao preparo do solo, manejo de água e parcelamento do nitrogênio. **Acta Scientiarum: Agronomy**, v. 25, n. 1, p. 89-96, 2003. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v25i1.2453>.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Embrapa Informação Tecnológica, Planaltina, DF, 2 ed., 416 p., 2004.

SOUZA, D. F. S.; PINTO, J. V. de N.; COSTA, D. L. P.; VIEIRA, I. C. de O.; SILVA, T. G. F. da; SOUZA, P. J. de O. P. Biophysical controls of evapotranspiration in cowpea cultivation

under different water regimes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, p. 725-732, 2019. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n10p725-732>.

TABELA BRASILEIRA DE COMPOSIÇÃO DE ALIMENTOS/NEPA - UNICAMP. TACO, NEPA-UNICAMP, Campinas, 161 p., 2011.

TAIZ, L.; ZEIGLER, E. MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal.** 6ª Edição, Porto Alegre: Artmed, 858 p., 2017.

TANG, X.; LI, H.; DESAI, A. R.; NAGY, Z.; LUO, J.; KOLB, T. E.; OLIOSO, A.; XU, X.; YAO, L.; KUTSCH, W.; PILEGAARD, K.; KÖSTNER, B.; AMMANN, C. How is water-use efficiency of terrestrial ecosystems distributed and changing on Earth?. **Scientific Reports**, v. 4, n. 1, p. 7483, 2014. <https://doi.org/10.1038/srep07483>.

TROVÃO, D. M. B. M. de.; FERNANDES, P. D.; ANDRADE, L. A. de.; NETO, J. D. Variações sazonais de aspectos fisiológicos de espécies da Caatinga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 307-311, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662007000300010>.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP. **Tabela Brasileira de Composição de Alimentos - TBCA.** Food Research Center (FoRC). Versão 7.1. São Paulo, 2020. Disponível em: <http://www.fcf.usp.br/tbca>. Acesso em: 25 dez. 2023.

VERMEIREN, G. A.; JOBLING, G. A. Irrigação localizada, **Estudos FAO: Irrigação e Drenagem**, v. 36, 184 p., 1997.

VERSLUES, P. E.; AGARWAL, M.; KATIYAR-AGARWAL, S.; ZHU, J.; ZHU, J. Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stress that affect plant water status. **The Plant Journal**, v. 45, p. 523-539, 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2005.02593.x>.

WARSI, M. K.; HOWLADAR, S. M.; ALSHARIF, M. A. Regulon: An overview of plant

abiotic stress transcriptional regulatory system and role in transgenic plants. **Brazilian Journal of Biology**, v. 83, 2021. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.245379>.

XU, X.; RAY, R.; GU, Y.; PLOEHN, H. J.; GEARHEART, L.; RAKER, K.; SCRIVENS, W. A. Electrophoretic analysis and purification of fluorescent single-walled carbon nanotube fragments. **Journal of the American Chemical Society**, v. 126, n. 40, p. 12736–12737, 2004. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ja040082h>.

ZAMBIASI, C. A. **Qualidade de grãos de feijão armazenados em diferentes condições de temperatura**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais, 77 p., 2015.

ZANDONADI, D. B.; SANTOS, M. P.; MEDICI, L. O.; SILVA, J. Ação da matéria orgânica e suas frações sobre a fisiologia de hortaliças. **Horticultura Brasileira**, v. 32, n. 1, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362014000100003>.

ZUFFO, A. M.; ANDRADE, F. R.; SCHOSSLER T. R.; MILHOMEM D. M.; PIAUILINO A. C. Eficiência na determinação indireta do nitrogênio foliar a partir do índice SPAD. **Enciclopédia biosfera, Centro Científico do Saber**, v. 8, n. 15, p. 802-820, 2012.

9. ANEXOS

Anexo 1. Solução estoque A+B (solução N4: 85% NO₃+15%NH₄) aplicada no feijoeiro em 27/06/2023.

| Solução estoque A+B - N4: 85% NO₃ + 15% NH₄ | |
|--|------------------------------|
| Solução estoque A | (g 30 L⁻¹) |
| Nitrato de cálcio | 985 |
| Nitrato de potássio | 1015 |
| Ferilene | 85 |
| Solução estoque B | |
| Nitrato de magnésio | 445 |
| Sulfato de potássio | 255 |
| MAP | 656 |
| MKP | 140 |
| Sulfato de magnésio | 740 |
| Sulfato de manganês | 4 |
| Sulfato de zinco | 9 |
| Sulfato de cobre | 1,5 |
| Molibdato de sódio | 1 |
| Bórax | 10 |

Anexo 2. Análise de variância (ANOVA) para matéria seca de raiz (MSR) e matéria seca total (MST).

| Tabela de Análise de Variância para MSR e MST | | | | | | | | | |
|--|----|-------|----------|----------|---------|--------|--------|--------|--------|
| FV | GL | SQ | | QM | | Fc | | Pr>Fc | |
| | | MSR | MST | MSR | MST | MSR | MST | MSR | MST |
| ÁGUA | 3 | 0,189 | 4,176975 | 0,062927 | 1,39233 | 36,016 | 10,598 | 0 | 0,0037 |
| erro 1 | 8 | 0,014 | 1,051037 | 0,001747 | 0,13138 | | | | |
| ARBO | 1 | 0,019 | 0,196675 | 0,01885 | 0,19668 | 2,607 | 1,453 | 0,1451 | 0,2626 |
| ÁGUA*ARBO | 3 | 0,018 | 0,08921 | 0,005887 | 0,02974 | 0,814 | 0,22 | 0,5211 | 0,8801 |
| erro 2 | 8 | 0,058 | 1,083184 | 0,007231 | 0,1354 | | | | |
| Total corrigido | 23 | 0,297 | 6,597081 | | | | | | |

Anexo 3. Teste Tukey do fator diferentes lâminas de irrigação para matéria seca de raiz (MSR).

| Teste Tukey para MSR – ÁGUA |
|------------------------------------|
|------------------------------------|

| Tratamentos | Médias | Resultados do teste |
|-------------|----------|---------------------|
| 70% | 0,887633 | c |
| 80% | 0,97965 | b |
| 100% | 1,092733 | a |
| 90% | 1,104183 | a |

Anexo 4. Teste Tukey do fator diferentes lâminas de irrigação para matéria seca total (MST).

| Teste Tukey para MST – ÁGUA | | |
|-----------------------------|----------|---------------------|
| Tratamentos | Médias | Resultados do teste |
| 70% | 4,4293 | b |
| 80% | 5,275483 | a |
| 100% | 5,430233 | a |
| 90% | 5,437517 | a |

Anexo 5. ANOVA para taxa líquida de fotossíntese (A) em feijoeiro aos 40 DAP em Brasília, DF.

| Tabela de Análise de Variância para A | | | | | |
|---------------------------------------|----|---------|---------|-------|--------|
| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
| AGUA | 3 | 16,4511 | 5,48369 | 0,85 | 0,5044 |
| erro 1 | 8 | 51,5969 | 6,44961 | | |
| ARBO | 1 | 6,41742 | 6,41742 | 1,046 | 0,3364 |
| AGUA*ARBO | 3 | 0,58897 | 0,19632 | 0,032 | 0,9918 |
| erro 2 | 8 | 49,099 | 6,13738 | | |
| Total corrigido | 23 | 124,153 | | | |

Anexo 6. ANOVA para condutância estomática (gs) em feijoeiro aos 40 DAP em Brasília, DF.

| Tabela de Análise de Variância para gs | | | | | |
|--|----|----------|----------|-------|--------|
| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
| AGUA | 3 | 0,003685 | 0,001228 | 5,783 | 0,0211 |
| erro 1 | 8 | 0,001699 | 0,000212 | | |
| ARBO | 1 | 0,000571 | 0,000571 | 1,258 | 0,2945 |
| AGUA*ARBO | 3 | 0,001023 | 0,000341 | 0,751 | 0,5519 |
| erro 2 | 8 | 0,003633 | 0,000454 | | |
| Total corrigido | 23 | 0,010611 | | | |

Anexo 7. Teste não paramétrico Kruskal-Wallis para gs.

| Teste Kruskal-Wallis para gs | | |
|-------------------------------------|-------------------------|---------|
| Chi-Quadrado | Graus de Liberdade (df) | p-valor |
| 8,8267 | 7 | 0,2653 |

Anexo 8. ANOVA para concentração interna de CO₂ (Ci) em feijoeiro aos 40 DAP em Brasília, DF.

| Tabela de Análise de Variância para Ci | | | | | |
|---|----|-------------|------------|-------|--------|
| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
| AGUA | 3 | 405,3244 | 135,108133 | 3,233 | 0,0819 |
| erro 1 | 8 | 334,2852 | 41,78565 | | |
| ARBO | 1 | 23,221419 | 23,221419 | 0,519 | 0,4919 |
| AGUA*ARBO | 3 | 172,253481 | 57,417827 | 1,283 | 0,3445 |
| erro 2 | 8 | 358,065854 | 44,758232 | | |
| Total corrigido | 23 | 1293,150354 | | | |

Anexo 9. ANOVA para transpiração (E) em feijoeiro aos 40 DAP em Brasília, DF.

| Tabela de Análise de Variância para E | | | | | |
|--|----|-----------|----------|-------|--------|
| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
| AGUA | 3 | 4,180186 | 1,393395 | 5,503 | 0,024 |
| erro 1 | 8 | 2,025687 | 0,253211 | | |
| ARBO | 1 | 0,294307 | 0,294307 | 0,261 | 0,623 |
| AGUA*ARBO | 3 | 1,183881 | 0,394627 | 0,35 | 0,7901 |
| erro 2 | 8 | 9,007865 | 1,125983 | | |
| Total corrigido | 23 | 16,691927 | | | |

Anexo 10. Teste Tukey do fator diferentes lâminas de irrigação para transpiração (E).

| Teste Tukey para E – ÁGUA | | |
|----------------------------------|----------|---------------------|
| Tratamentos | Médias | Resultados do teste |
| 70% | 7,059467 | b |
| 100% | 7,139417 | b |

| | | |
|-----|----------|----|
| 80% | 7,712833 | ab |
| 90% | 8,072167 | a |

Anexo 11. ANOVA para índice SPAD em feijoeiro aos 40 DAP em Brasília, DF.

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|------------------|----|-----------|-----------|--------|--------|
| AGUA | 3 | 46,874583 | 15,624861 | 12,008 | 0,0025 |
| erro 1 | 8 | 10,41 | 1,30125 | | |
| ARBO | 1 | 5,70375 | 5,70375 | 4,507 | 0,0665 |
| AGUA*ARBO | 3 | 0,217917 | 0,072639 | 0,057 | 0,9807 |
| erro 2 | 8 | 10,123333 | 1,265417 | | |
| Total corrigido | 23 | 73,329583 | | | |

Anexo 12. Teste Tukey do fator diferentes lâminas de irrigação para índice SPAD.

| Tratamentos | Médias | Resultados do teste |
|-------------|-----------|---------------------|
| 70% | 14,133333 | b |
| 80% | 16,35 | a |
| 100% | 17,433333 | a |
| 90% | 17,666667 | a |

Anexo 13. ANOVA para eficiência do uso da água (EUA) em feijoeiro aos 40 DAP em Brasília, DF.

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|------------------|----|----------|----------|-------|--------|
| AGUA | 3 | 0,172284 | 0,057428 | 1,294 | 0,3411 |
| erro 1 | 8 | 0,354906 | 0,044363 | | |
| ARBO | 1 | 0,655249 | 0,655249 | 7,612 | 0,0247 |
| AGUA*ARBO | 3 | 0,050079 | 0,016693 | 0,194 | 0,8977 |
| erro 2 | 8 | 0,688639 | 0,08608 | | |
| Total corrigido | 23 | 1,921157 | | | |

Anexo 14. ANOVA para atividade da enzima superóxido desmutase (SOD).

| Tabela de Análise de Variância para enzima SOD | | | | | |
|---|----|----------|----------|-------|--------|
| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
| AGUA | 3 | 0,197917 | 0,065972 | 4,948 | 0,0314 |
| erro 1 | 8 | 0,106667 | 0,013333 | | |
| ARBO | 1 | 0,00375 | 0,00375 | 0,237 | 0,6395 |
| AGUA*ARBO | 3 | 0,014583 | 0,004861 | 0,307 | 0,8198 |
| erro 2 | 8 | 0,126667 | 0,015833 | | |
| Total corrigido | 23 | 0,449583 | | | |

Anexo 15. Teste Tukey do fator diferentes lâminas de irrigação para atividade da enzima superóxido desmutase (SOD).

| Teste Tukey para enzima SOD – ÁGUA | | |
|---|----------|---------------------|
| Tratamentos | Médias | Resultados do teste |
| 80% | 2,433333 | b |
| 90% | 2,45 | ab |
| 70% | 2,583333 | ab |
| 100% | 2,65 | a |

Anexo 16. Regressão quadrática para lâminas de irrigação em função da atividade da enzima superóxido desmutase (SOD). Dados transformados por raiz de X.

| Equação de Regressão dos níveis de água e enzima SOD | | | | | |
|---|------------|------------|--------|--------|------|
| Parâmetro | Estimativa | SE | t | Pr> t | Nota |
| b0 | 8,5575 | 1,68321782 | 5,084 | 0,0009 | ** |
| b1 | -0,146583 | 0,04012481 | -3,653 | 0,0065 | ** |
| b2 | 0,000875 | 0,0002357 | 3,712 | 0,0059 | ** |
| R ² | 99.96% | | | | |

Anexo 17. ANOVA para atividade da enzima catalase (CAT).

| Tabela de Análise de Variância para CAT | | | | | |
|--|----|------------|-----------|---------|-------|
| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
| ÁGUA | 3 | 140,427917 | 46,809306 | 488,445 | 0 |
| erro 1 | 8 | 0,766667 | 0,095833 | | |
| ARBO | 1 | 40,300417 | 40,300417 | 711,184 | 0 |

| | | | | | |
|------------------------|-----------|-------------------|----------|--------|--------|
| ÁGUA*ARBO | 3 | 5,05125 | 1,68375 | 29,713 | 0,0001 |
| erro 2 | 8 | 0,453333 | 0,056667 | | |
| Total corrigido | 23 | 186,999583 | | | |

Anexo 18. Teste Tukey do fator diferentes lâminas de irrigação para atividade da enzima catalase (CAT).

| Teste Tukey para CAT - ÁGUA | | |
|------------------------------------|----------|---------------------|
| Tratamentos | Médias | Resultados do teste |
| 70% | 9,716667 | b |
| 80% | 11,55 | a |
| 90% | 6,416667 | c |
| 100% | 5,6 | d |

Anexo 19. ANOVA para atividade da enzima peroxidase (APX).

| Tabela de Análise de Variância para APX | | | | | |
|--|-----------|-----------------|----------|--------|--------|
| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
| AGUA | 3 | 0,321667 | 0,107222 | 51,467 | 0 |
| erro 1 | 8 | 0,016667 | 0,002083 | | |
| ARBO | 1 | 0,135 | 0,135 | 64,8 | 0 |
| AGUA*ARBO | 3 | 0,048333 | 0,016111 | 7,733 | 0,0095 |
| erro 2 | 8 | 0,016667 | 0,002083 | | |
| Total corrigido | 23 | 0,538333 | | | |

Anexo 20. Teste Tukey do fator diferentes lâminas de irrigação para atividade da enzima peroxidase (APX).

| Teste Tukey para APX – ÁGUA | | |
|------------------------------------|----------|---------------------|
| Tratamentos | Médias | Resultados do teste |
| 70% | 0,95 | c |
| 100% | 1,066667 | b |
| 90% | 1,15 | b |
| 80% | 1,266667 | a |

Anexo 21. Regressão quadrática para lâminas de irrigação em função da enzima peroxidase

(APX).

| Equação de regressão dos níveis de água para variável APX | | | | | |
|---|------------|------------|---------|-------|------|
| Parâmetro | Estimativa | SE | T | Pr> t | Nota |
| b0 | -6,19 | 0,66535026 | -9,303 | 0 | ** |
| b1 | 0,172333 | 0,01586072 | 10,865 | 0 | ** |
| b2 | -0,001 | 9,32E-05 | -10,733 | 0 | ** |
| R ² | 79.69% | | | | |

Anexo 22. Teste de normalidade W de Shapiro-Wilk e seu valor de significância para produtividade.

| Teste de Normalidade W de Shapiro-Wilk - PG | | | | |
|---|----|-----------------|-----------|--|
| Variável | n | W | Pr<W | |
| A | 24 | 0.9798565387221 | 0.8932067 | |
| G | 24 | 0.8687388540556 | 0.0049702 | |
| CI | 24 | 0.9498879455827 | 0.2694376 | |
| E | 24 | 0.9580495778537 | 0.4005046 | |
| EUA | 24 | 0.9598363218868 | 0.4351434 | |
| SPAD | 24 | 0.9275628768016 | 0.0860028 | |
| MSR | 24 | 0.9784654104183 | 0.8659826 | |
| MSPA | 24 | 0.9243260755324 | 0.0728457 | |
| MST | 24 | 0.9329472159621 | 0.1134659 | |
| CAT | 24 | 0.9424454531597 | 0.1848985 | |
| APX | 24 | 0.8986806494049 | 0.0201832 | |
| SOD | 24 | 0.9160953104288 | 0.0479126 | |
| UMID_BS | 24 | 0.9356075489746 | 0.1301346 | |
| CINZAS | 24 | 0.9261132798353 | 0.0798342 | |
| PROT | 24 | 0.9364355886281 | 0.1358044 | |
| LIP | 24 | 0.9486359488618 | 0.2530795 | |
| CARBO | 24 | 0.9643416895762 | 0.5316045 | |
| PRODT | 24 | 0.8367545009513 | 0.0012534 | |
| PESOMIL | 24 | 0.9608448060155 | 0.4556324 | |

Algoritmo usado: AS R94. T. Applied Statistic - Serie C (1995) vol. 44, n. 4.

Anexo 23. ANOVA para peso de cem grãos.

| Tabela de Análise de Variância para P100 | | | | | |
|--|----|-------------|-------------|--------|--------|
| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
| AGUA | 3 | 4636,5851 | 1545,528367 | 6,448 | 0,0158 |
| erro 1 | 8 | 1917,550133 | 239,693767 | | |
| ARBO | 1 | 1597,401667 | 1597,401667 | 10,445 | 0,012 |
| AGUA*ARBO | 3 | 487,3553 | 162,451767 | 1,062 | 0,4174 |
| erro 2 | 8 | 1223,474733 | 152,934342 | | |
| Total corrigido | 23 | 9862,366933 | | | |

Anexo 24. Teste Tukey do fator diferentes lâminas de irrigação para peso de cem grãos.

Teste Tukey para P100

| Tratamentos | Médias | Resultados do teste |
|-------------|------------|---------------------|
| 70,00% | 312,72 | b |
| 80,00% | 334,925 | ab |
| 90,00% | 326,146667 | ab |
| 100,00% | 350,995 | a |

Anexo 25. ANOVA para umidade.

Tabela de Análise de Variância para umidade

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|------------------|----|-------------|-----------|-------|--------|
| AGUA | 3 | 820,182179 | 273,39406 | 6,092 | 0,0184 |
| erro 1 | 8 | 358,994067 | 44,874258 | | |
| ARBO | 1 | 4,175004 | 4,175004 | 0,059 | 0,8141 |
| AGUA*ARBO | 3 | 59,812513 | 19,937504 | 0,282 | 0,8371 |
| erro 2 | 8 | 565,537733 | 70,692217 | | |
| Total corrigido | 23 | 1808,701496 | | | |

Anexo 26. Teste Tukey do fator diferentes lâminas de irrigação para umidade.

Teste Tukey para umidade

| Tratamentos | Médias | Resultados do teste |
|-------------|-----------|---------------------|
| 80% | 35,875 | b |
| 90% | 36,531667 | b |
| 70% | 42,775 | ab |
| 100% | 50,376667 | a |

Anexo 27. Regressão quadrática para lâminas de irrigação em função da umidade.

Equação de Regressão das lâminas de irrigação para umidade

| Parâmetro | Estimativa | SE | t | Pr> t | Nota |
|----------------|------------|-------------|--------|--------|------|
| b0 | 389,670917 | 97,64940319 | 3,991 | 0,004 | ** |
| b1 | -8,582008 | 2,3277815 | -3,687 | 0,0062 | ** |
| b2 | 0,051863 | 0,01367392 | 3,793 | 0,0053 | ** |
| R ² | 98.84% | | | | |

Anexo 28. ANOVA para teor de cinzas.

Tabela de Análise de Variância para teor de cinzas

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|------------------|----|----------|----------|--------|--------|
| AGUA | 3 | 0,855950 | 0,285317 | 13,006 | 0,0019 |
| erro 1 | 8 | 0,175500 | 0,21937 | | |
| ARBO | 1 | 0,036817 | 0,036817 | 9,430 | 0,0153 |
| AGUA*ARBO | 3 | 0,086950 | 0,028904 | 7,424 | 0,0106 |
| erro 2 | 8 | 0,031233 | 0,003904 | | |
| Total corrigido | 23 | 1,186450 | | | |

Anexo 29. ANOVA para teor de lipídios.

Tabela de Análise de Variância para teor de lipídios

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|------------------|----|----------|----------|-------|--------|
| AGUA | 3 | 0,724746 | 0,241582 | 2,993 | 0,0955 |
| erro 1 | 8 | 0,6457 | 0,080713 | | |
| ARBO | 1 | 0,004538 | 0,004538 | 0,072 | 0,7948 |
| AGUA*ARBO | 3 | 0,332046 | 0,110682 | 1,764 | 0,2316 |
| erro 2 | 8 | 0,501967 | 0,062746 | | |
| Total corrigido | 23 | 2,208996 | | | |

Anexo 30. ANOVA para teor de proteínas.

Tabela de Análise de Variância para teor de proteínas

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|------------------|----|-----------|----------|-------|--------|
| AGUA | 3 | 2,451767 | 0,817256 | 0,492 | 0,6974 |
| erro 1 | 8 | 13,280533 | 1,660067 | | |
| ARBO | 1 | 1,6854 | 1,6854 | 5,665 | 0,0445 |
| AGUA*ARBO | 3 | 2,040367 | 0,680122 | 2,286 | 0,1556 |
| erro 2 | 8 | 2,380133 | 0,297517 | | |
| Total corrigido | 23 | 21,8382 | | | |

Anexo 31. ANOVA para teor de carboidratos.

Tabela de Análise de Variância para teor de carboidratos

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|------------------|----|----------|----------|-------|--------|
| AGUA | 3 | 6,161046 | 2,053682 | 0,872 | 0,4945 |
| erro 1 | 8 | 18,8321 | 2,354012 | | |
| ARBO | 1 | 2,012604 | 2,012604 | 5,786 | 0,0428 |
| AGUA*ARBO | 3 | 2,584079 | 0,86136 | 2,476 | 0,1357 |

| | | | |
|-----------------|----|-----------|----------|
| erro 2 | 8 | 2,782567 | 0,347821 |
| Total corrigido | 23 | 32,372396 | |