



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

LUINA SANTOS SERRA FREIRE

MÉTODOS DE APLICAÇÃO DE BRASSINOSTEROIDE EM *Vigna unguiculata* L. SOB CONDIÇÕES DE DÉFICIT HÍDRICO

SÃO LUÍS

2026

LUINA SANTOS SERRA FREIRE

MÉTODOS DE APLICAÇÃO DE BRASSINOSTEROIDE EM *Vigna unguiculata* L. SOB CONDIÇÕES DE DÉFICIT HÍDRICO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias da Universidade Estadual do Maranhão, para obtenção do título de mestre em Ciências Agrárias.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Massi Ferraz
Coorientador: Prof. Dr. Sebastião de Oliveira Maia Júnior

SÃO LUÍS

2026

LUINA SANTOS SERRA FREIRE


Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias da Universidade Estadual do Maranhão, para obtenção do título de mestre em Ciências Agrárias.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Massi Ferraz
Coorientador: Prof. Dr. Sebastião de Oliveira Maia Júnior


Aprovada em: 25 / 04 /2026

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Tiago Massi Ferraz (Orientador)
Universidade Estadual do Maranhão - UEMA

 Documento assinado digitalmente
DIEGO SILVA BATISTA
Data: 22/04/2026 11:08:36-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Diego Silva Batista (Membro)
Universidade Federal da Paraíba – UFPB

 Documento assinado digitalmente
MARA DE MENEZES DE ASSIS GOMES
Data: 22/04/2026 14:32:33-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profª. Dra. Mara de Menezes de Assis Gomes (Membro)
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF

SÃO LUÍS
2026

Dedico esta dissertação a minha maravilhosíssima e digníssima Mãe.

AGRADECIMENTOS

Com o amor-próprio que me cabe e me resta, eu agradeço a mim mesma por não me deixar ser guiada por pensamentos e atitudes, próprios e alheios, que me desestimulavam a continuar nessa jornada chamada curso de mestrado. Posso dizer que me sinto realizando um sonho de criança. E os meus agradecimentos também são para:

Meu orientador, *Prof. Dr. Tiago Massi Ferraz*, que com a sua paciência, sabedoria e boa vontade me orientou e me deu suporte nessa jornada.

Dr. Sebastião Maia Júnior que, com dedicação, presteza, paciência e sabedoria, me coorientou durante todo o curso.

Minha queridíssima, maravilhosíssima e digníssima Mãe, *Jaciara Santos Serra Freire*, por sempre apoiar as minhas decisões, estar ao meu lado sendo mãe e pai, falar palavras de incentivo e me aconselhar a não desistir. Meus avós maternos, *Ana Santos e Aroldo Martins Costa (in memoriam)*, que me deixaram muitos ensinamentos e uma saudade sem fim. A Família Santos, que me apoia e incentiva.

As pessoas que fazem parte do Laboratório de Ciências Ambientais e Biodiversidade do Centro de Ciências Agrárias-LCAB/CCA/UEMA, que contribuíram direta e indiretamente para o desenvolvimento do meu projeto de pesquisa. Em especial, para *Dra Jailma Ribeiro e Dr. Robson Felipe*.

O servidor *Ronald* da Agência Estadual de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural do Maranhão (AGERP), por ter doado as sementes de feijão-caupi BRS guariba para a realização da pesquisa.

Os amigos que fiz durante esse percurso, que me ajudaram e me incentivavam a continuar no curso. Passamos bons momentos de aprendizagem juntos!

Os docentes e a toda a comunidade científica do Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias (PPGCIAG) que colaboraram direta e indiretamente para a minha formação.

Meus sinceros agradecimentos!

“Não sei o que o mundo pode achar de mim; mas para mim mesmo parece que fui apenas um menino, brincando na praia e me divertindo quando encontro, vez ou outra, uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita do que o normal, enquanto o grande oceano da verdade jaz totalmente não descoberto a minha frente.”

Isaac Newton

RESUMO

O déficit hídrico é considerado o principal fator abiótico que limita a produção das lavouras em todo o mundo, incluindo o feijão-caupi. Esse fator ambiental reduz a atividade fotossintética e, conseqüentemente, prejudica o crescimento e o desenvolvimento de plantas. Contudo, alternativas para mitigar os efeitos do déficit hídrico são bastante utilizadas a exemplo de biorreguladores vegetais como brassinosteroides (BRs). Por isso, o presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos de diferentes métodos de aplicação de brassinosteroide no cultivo do feijão-caupi em condições de déficit hídrico. O experimento foi realizado em esquema fatorial 2 x 4, com duas condições hídricas (plantas irrigadas e sob déficit hídrico); e quatro métodos de aplicação de brassinosteroides (sem brassinosteroide - controle, embebição de sementes, aplicação foliar e embebição de sementes + aplicação foliar), totalizando oito tratamentos com quatro repetições. Foi utilizado o 24-epibrassinolídeo (EBR) na concentração 0,1 μM , e o déficit hídrico realizado com a suspensão progressiva da irrigação durante 10 dias. O conteúdo relativo de água (CRA) e o armazenamento de água na folha (AAF) reduziram nas plantas de feijão-caupi submetidas ao déficit hídrico em comparação as plantas irrigadas, com maior redução nas plantas controle. Observou-se, aos 3 DAE (três dias após o estresse), aumento significativo tanto do conteúdo de prolina quanto dos carotenoides nas plantas do tratamento embebição (E) em condições de déficit hídrico comparadas às plantas irrigadas. Os componentes de produção comprimento de vagem (CV) e o peso de vagens (PV) reduziram apenas nas plantas controle em condições de déficit hídrico em comparação às plantas irrigadas. O número de vagens por planta (NVP) reduziu em todas as plantas com restrição hídrica em comparação às irrigadas. No entanto, o tratamento E aumentou NVP em relação às plantas controle na mesma condição de déficit hídrico. O peso de 100 sementes aumentou nas plantas do feijão-caupi dos tratamentos E e E+AF expostas ao déficit hídrico em comparação às plantas irrigadas. Esses resultados trazem novas informações sobre métodos de aplicação 24-epibrassinolídeo na mitigação do déficit hídrico em plantas de feijão-caupi e podem servir como base para novos estudos em outras culturas de interesse agrícola, bem como do feijão em condições de campo.

Palavras-chave: 24-epibrassinolídeo. Estresse hídrico. Extravazamento de eletrólitos. Ajuste osmótico.

ABSTRACT

Water deficit is considered the main abiotic factor limiting machine production worldwide, including cowpea. This environmental factor reduces photosynthetic activity and, consequently, impairs plant growth and development. However, alternatives to mitigate the effects of water deficit are widely used, such as plant bioregulators like brassinosteroids (BRs). Therefore, this study aimed to evaluate the effects of different brassinosteroid application methods on cowpea cultivation under water deficit conditions. The experiment was conducted in a 2 x 4 factorial design, with two water conditions (irrigated plants and plants under water deficit); and four brassinosteroid application methods (no brassinosteroid - control, seed soaking, foliar application, and seed soaking + foliar application), totaling eight treatments with four replications. 24-Epibrassinolide (EBR) was used at a concentration of 0.1 μ M, and water deficit was achieved by progressively suspending transparency for 10 days. The relative water content (RWC) and leaf water storage (LAS) decreased in cowpea plants subjected to water deficit compared to irrigated plants, with a greater reduction in control plants. At 3 DAE (three days after stress), a significant increase in both proline and carotenoid content was observed in plants from the soaking treatment (E) under water deficit conditions compared to irrigated plants. The yield components pod length (PL) and pod weight (PW) decreased only in control plants under water deficit conditions compared to irrigated plants. The number of pods per plant (NPP) was impaired in all plants with water restriction compared to irrigated plants. However, treatment E increased the NVP (Net Potassium Value) compared to the control plants under the same water deficit conditions. The weight of 100 seeds increased in cowpea plants from treatments E and E+AF exposed to water deficit compared to irrigated plants. These results provide new information on 24-epibrassinolide application methods for mitigating water deficit in cowpea plants and can serve as a basis for further studies in other crops of agricultural interest, as well as beans under field conditions.

Keywords: 24-epibrassinolide. Water stress. Electrolyte leakage. Osmotic adjustment.

LISTAS DE FIGURAS

- Fig. 1** Desenho experimental: duas condições hídricas (controle e déficit hídrico); e quatro métodos de aplicação do bioregulador vegetal brassinosteróide (controle, embebição de sementes, aplicação foliar e embebição de semente + aplicação foliar)..... 26
- Fig. 2** Conteúdo relativo de água (CRA), Armazenamento de água na folha (AAF) e Déficit de saturação de água (DAS) e Razão peso fresco e peso seco (PF/PS) em plantas de feijão cultivadas sob duas condições de disponibilidade hídrica (irrigadas e déficit hídrico) e quatro métodos de aplicação de brassinosteróide (controle – sem BR (C), Embebição das sementes (E), Aplicação foliar (AF) e Embebição das sementes + Aplicação foliar (E+AF)). São mostrados os valores da média \pm erro padrão (n=4). DAE = dias após o estresse. * = significativo (P < 0,05). ** = significativo (P < 0,01). ns = não significativo. As letras maiúsculas iguais não diferem entre as condições hídricas para o mesmo método de aplicação de brassinosteróide. As letras minúsculas iguais não diferem entre os métodos de aplicação de brassinosteróide em cada condição hídrica (P < 0,05; Teste de Tukey)..... 32
- Fig. 3** Prolina e Extravasamento de eletrólitos (EE) em plantas de feijão cultivadas sob duas condições de disponibilidade hídrica (irrigadas e déficit hídrico) e quatro métodos de aplicação de brassinosteróide (controle – sem BR (C), Embebição das sementes (E), Aplicação foliar (AF) e Embebição das sementes + Aplicação foliar (E+AF)). São mostrados os valores da média \pm erro padrão (n=4). DAE = dias após o estresse. * = significativo (P < 0,05). ** = significativo (P < 0,01). ns = não significativo. As letras maiúsculas iguais não diferem entre as condições hídricas para o mesmo método de aplicação de brassinosteróide. As letras minúsculas iguais não diferem entre os métodos de aplicação de brassinosteróide em cada condição hídrica (P < 0,05; Teste de Tukey)..... 33
- Fig. 4** Clorofila *a*, Clorofila *b*, Clorofila total e Carotenóides em plantas de feijão cultivadas sob duas condições de disponibilidade hídrica (irrigadas e déficit hídrico) e quatro métodos de aplicação de brassinosteróide (controle – sem BR (C), Embebição das sementes (E), Aplicação foliar (AF) e Embebição das sementes + Aplicação foliar (E+AF)). São mostrados os valores da média \pm erro padrão (n=4). DAE = dias após o estresse. * = significativo (P < 0,05). ** = significativo (P < 0,01). ns = não significativo. As letras maiúsculas iguais não diferem entre as condições hídricas para o mesmo método de aplicação de brassinosteróide. As letras minúsculas iguais não diferem entre os métodos de aplicação de brassinosteróide em cada condição hídrica (P < 0,05; Teste de Tukey). 34

Fig. 5 Eficiência fotoquímica máxima do fotossistema II (F_v/F_m) em plantas de feijão cultivadas sob duas condições de disponibilidade hídrica (irrigadas e déficit hídrico) e quatro métodos de aplicação de brassinosteróide (controle – sem BR (C), Embebição das sementes (E), Aplicação foliar (AF) e Embebição das sementes + Aplicação foliar (E+AF)). São mostrados os valores da média \pm erro padrão (n=4). DAE = dias após o estresse. A linha na horizontal indica o valor de F_v/F_m 0,75. * = significativo (P < 0,05). ** = significativo (P < 0,01). ns = não significativo. As letras maiúsculas iguais não diferem entre as condições hídricas para o mesmo método de aplicação de brassinosteróide. As letras minúsculas iguais não diferem entre os métodos de aplicação de brassinosteróide em cada condição hídrica (P < 0,05; Teste de Tukey)..... 35

Fig. 6 Análise de componentes principais para características fisiológicas e de produção do feijão-caupi cultivado sob condições irrigadas (IRRIG) ou de déficit hídrico (ESTRES) e tratadas com diferentes métodos de aplicação de brassinosteróides (0,1 μ M). 3 e 10 DAE correspondem às avaliações aos três e 10 dias após o estresse por déficit hídrico. Os tratamentos são: IRRIG C controle; IRRIG E embebição; IRRIG AF aplicação foliar; IRRIG E+AF embebição + aplicação foliar; ESTRES C controle; ESTRES E embebição; ESTRES AF aplicação foliar; ESTRES E+AF embebição + aplicação foliar. As variáveis são: conteúdo relativo de água CRA; déficit de saturação de água DSA; carotenóides CAR; extravasamento de eletrólitos EE; eficiência máxima quântica do fotossistema II $F_v.F_m$; número de vagens por planta NVP; peso de 100 grãos P100G..... 37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Regime hídrico das plantas de feijão-caupi no período déficit hídrico.	28
Tabela 2 Comprimento de vagem (CV), peso médio de vagem (PV), peso de sementes por vagem (PSV), número de vagens por planta (NVP), número de sementes por planta (NSP), e peso de 100 sementes (P100) de plantas de feijão cultivadas sob duas condições de disponibilidade hídrica (irrigadas e déficit hídrico) e quatro métodos de aplicação de brassinosteróide (controle – sem BR (C), Embebição das sementes (E), Aplicação foliar (AF) e Embebição das sementes + Aplicação foliar (E+AF).	37

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AAF = Armazenamento de água na folha

BRs= Brassinosteroides

CAV = Capacidade de armazenamento de água no vaso

CC = Capacidade de campo

CRA = Conteúdo relativo de água na folha

CV= Comprimento de vagem

DAE = Dias após o estresse

DAS = Déficit de saturação de água

DAS = Dias após a semeadura

DH = Déficit hídrico

EBR = 24-epibrassinolídeo

EE = Extravazamento de eletrólitos

F_v/F_m = Eficiência quântica máxima

LSS = Leitura do solo úmido

LSU = Leitura do solo úmido

MF = Massa fresca

MS = Massa seca

MT = Massa túrgida

NSP = Número de sementes por planta

NVP = Número de vagens por planta

PCA = Análise de componentes principais

PS= Peso seco

PSII = Fotossistema II

PSV = Peso de sementes por vagem

PU = Peso úmido

PV = Peso médio de vagem

P100 = peso de cem sementes

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	12
1 INTRODUÇÃO GERAL	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 <i>Vigna unguiculata</i> (L.) Walp	14
2.2 Efeitos fisiológicos causados pelo déficit hídrico em plantas.....	14
2.3 Brassinosteroide como mitigador do déficit hídrico em plantas.....	15
2.4 Métodos de aplicação de brassinosteroide (BR).....	16
REFERÊNCIAS	17
CAPÍTULO II	21
RESUMO	22
ABSTRACT	23
INTRODUÇÃO	24
MATERIAL E MÉTODOS	25
Localização do experimento, material vegetal e condições de crescimento	25
Tratamentos e Delineamento experimental	26
Preparação e aplicação de 24-epibrassinolídeo	26
Imposição dos regimes hídricos	27
Avaliações Fisiológicas e Componentes de Produção.....	28
Estado hídrico das plantas	28
Conteúdo de prolina.....	29
Extravasamento de eletrólitos (EE).....	29
Conteúdo de pigmentos fotossintetizantes.....	30
Fluorescência da clorofila <i>a</i>	30
Variáveis de produtividade.....	30
Análises estatísticas	31
RESULTADOS	31
DISCUSSÃO	38
CONCLUSÃO	40
REFERÊNCIAS	40

CAPÍTULO I

REFERENCIAL TEÓRICO

1 INTRODUÇÃO GERAL

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp.) é uma cultura de origem africana de grande importância socioeconômica para Região Nordeste do Brasil. Os estados que se destacam na produção de feijão-caupi são Bahia, Piauí, Maranhão e Pernambuco (CONAB, 2025). As sementes de feijão-caupi são excelentes fontes de proteínas, carboidratos, vitaminas, lipídios e minerais (Abebe; Alemayehu, 2022). Existem várias cultivares disponíveis no mercado provenientes da espécie *Vigna unguiculata* (L.) Walp., como a BRS Guariba, destinada à produção de grãos secos, a qual é moderadamente tolerante à seca (Filho *et al.*, 2006).

Como consequência das mudanças climáticas, o aumento da temperatura e o déficit hídrico podem afetar a fenologia e reduzir o crescimento e a produtividade de plantas de feijão-caupi (Barros *et al.*, 2021). Quando não há água suficiente no solo, as plantas diminuem a abertura estomática para evitar a perda de água, limitando a absorção de CO₂, o que afeta o crescimento e o desenvolvimento das plantas devido à redução do processo de fotossíntese (Osakabe *et al.*, 2014; Siddiqi e Husen, 2021)

O uso exógeno de brassinosteroides pode ser uma alternativa para a mitigação dos efeitos negativos do déficit hídrico em diferentes espécies de plantas. Os brassinosteroides (BRs) são um grupo de hormônios esteroides vegetais naturais que regulam vários processos fisiológicos e de desenvolvimento das plantas e são sintetizados em resposta aos estresses abióticos e bióticos (Liu *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2024).

Em condições adversas como o déficit hídrico a aplicação de BRs aumenta a eficiência quântica máxima do fotossistema II (PSII) aumenta o teor de clorofilas e carotenoides, estimula a síntese de prolina e reduz o extravasamento de eletrólitos, contribuindo para a manutenção da atividade fotossintética das plantas (Castañeda-Murillo *et al.*, 2022; Lima e Lobato, 2017; Mohammadi *et al.*, 2019). O brassinosteroide 24-epibrassinolídeo via foliar aumentou os pigmentos fotossintéticos (clorofila *a*, clorofila *b* e total) e o conteúdo de carotenoides, e reduziu os efeitos de compostos oxidantes em plantas de feijão-caupi também em condições de déficit hídrico (Lima; Lobato, 2017).

O método de aplicação pode influenciar a ação dos BRs no aumento da tolerância das plantas aos estresses abióticos (Silva *et al.*, 2024). A embebição de sementes com BRs é um método de tratamento pré-semeadura que pode induzir maior tolerância à seca e aumentar os componentes de produção de plantas sob déficit hídrico (Huang *et al.*, 2020). Já a aplicação foliar de BRs pode aumentar a atividade fotossintética de plantas em condições de déficit

hídrico (Mohammadi *et al.*, 2019). Nesse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos de métodos de aplicação de brassinosteróide em *Vigna unguiculata* em condições de déficit hídrico.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 *Vigna unguiculata* (L.) Walp.

Vigna Unguiculata (L.) Walp. (Família Botânica Fabacea) é uma espécie herbácea anual de ramos de hábito prostrado ou trepador volúvel, folhas compostas trifolioladas, flores solitárias ou em grupos, e vagem ereta indeiscente, conhecida popularmente como feijão-caupi, feijão-fradinho, feijão-macassar, feijão-de-corda, entre outros (Kinupp e Lorenzi, 2021). O centro de origem do feijão-caupi selvagem está localizado na África Austral, e o precursor evolutivo aceito do feijão-caupi é *Vigna unguiculata* subsp. *dekindtiana* (Harms) Verdc., amplamente distribuída pela África (Guimarães *et al.*, 2023).

O ciclo fenológico do feijão-caupi pode ser definido em duas fases: fase vegetativa e fase reprodutiva (Campos; Ribeiro; Rocha, 2000; De Moura *et al.*, 2012). Em relação à qualidade nutricional, as sementes de feijão-caupi são excelentes fontes de proteínas, carboidratos, vitaminas, lipídios e minerais para a dieta humana (Abebe; Alemayehu, 2022)

O feijão-caupi BRS Guariba foi lançado em 2004 pela EMBRAPA Meio-Norte e é indicada para o cultivo de sequeiro nos estados do Piauí e Maranhão (EMBRAPA, 2009). Essa cultivar tem crescimento indeterminado semiereto com resistência ao acamamento, e seu ciclo médio é de 65 a 70 dias, sendo destinada a produção de grãos secos (Freitas *et al.*, 2017). A redução da disponibilidade de água no solo pode afetar o crescimento e o desenvolvimento da cultura do feijão-caupi e, conseqüentemente, reduz a produtividade (Ferreira *et al.*, 2021).

2.2 Efeitos fisiológicos causados pelo déficit hídrico em plantas

A água, dióxido de carbono, luz solar e temperatura adequada são essenciais para o processo de fotossíntese. Entretanto, a escassez de água reduz a atividade fotossintética devido à diminuição da abertura estomática para evitar a perda de água e limita a absorção de CO₂, o que afeta o crescimento e o desenvolvimento das plantas (Osakabe *et al.*, 2014; Siddiqi e Husen, 2021). No que se refere às relações hídricas, estresse hídrico causado por falta de água reduz o

conteúdo relativo de água das folhas, resultando em danos celulares (Zeng *et al.*, 2024), conforme foi observado em plantas de *Solanum quitoense* Lam (Castañeda-Murillo *et al.*, 2022)

O estresse por deficiência hídrica, especialmente sob déficit hídrico severo, também pode resultar em uma redução substancial nas concentrações de clorofila *a*, clorofila *b*, clorofila total e carotenoides em plantas de feijão-caupi (Gholami *et al.*, 2023), além de reduzir os rendimentos de sementes da cultura (Lima e Lobato, 2017; Mohammadi *et al.*, 2020). O déficit hídrico pode causar efeitos negativos sobre a atividade fotossintética e os conteúdos de clorofilas e carotenoides, e reduzir a produção de sementes do feijão-comum (Mohammadi *et al.*, 2019). No entanto, o déficit hídrico aumentou o conteúdo de carotenoides em plantas de café (*Coffea arabica* L. cv. Icatu Vermelho), e esse aumento pode indicar atividade acessória de fotoproteção em que estes pigmentos funcionam como fotoprotetores que dissipam o excesso de energia absorvido pela clorofila, protegendo o aparato fotossintético no genótipo mais tolerante (Rodrigues *et al.*, 2023).

2.3 Brassinosteroide como mitigador do déficit hídrico em plantas

Os brassinosteroides (BRs) são um grupo de hormônios esteroides vegetais naturais que foi isolado pela primeira vez do pólen da *Brassica napus* L. (Grove, 1979; Liu *et al.*, 2022). Os BRs regulam vários processos fisiológicos e de desenvolvimento das plantas como, por exemplo, o crescimento e desenvolvimento de frutos e sementes, desenvolvimento de pólen, crescimento de raízes, senescência, divisão celular, desenvolvimento vascular, os quais são sintetizados em resposta aos estresses abióticos e bióticos (Siddiqi e Husen, 2021; Manghwar *et al.*, 2022).

A aplicação exógena de BRs é estudada em diferentes culturas de interesse agrícola e pode ser uma alternativa para a mitigação dos efeitos negativos de estresses abióticos, como o déficit hídrico, em diferentes espécies de plantas (Sousa *et al.*, 2026; Wang *et al.*, 2015). A mitigação de estresses abióticos nas plantas pode depender de fatores como o método de aplicação, concentração de BRs, espécie de planta, e a intensidade de estresse que pode influenciar a ação dos BRs no aumento da tolerância ao déficit hídrico (Silva *et al.*, 2024).

O brassinosteroide sintético 24-epibrassinolídeo (EBR) manteve o equilíbrio osmótico e a integridade da membrana de plantas de pimenta (*Capsicum annuum* L. var. frutescens (L.) Kuntze) em condições de déficit hídrico, o que contribuiu para a redução do extravasamento de eletrólitos (Khamsuk *et al.*, 2018). O EBR mantém a integridade das membranas celulares e, conseqüentemente, reduz o extravasamento de eletrólitos causado pelo

déficit hídrico (Avalbaev et al., 2024). Em plantas jovens de trigo submetidas ao déficit hídrico, a aplicação foliar de EBR minimizou o estresse oxidativo, reduzindo o vazamento de eletrólitos (Khan et al., 2021).

O EBR induz a síntese de substâncias osmoprotetoras como a prolina, que contribui para o ajuste osmótico, em plantas sob déficit hídrico. Em plantas de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) submetidas ao estresse causado por falta de água, a aplicação de EBR (concentração 0,5 µM) aumentou o nível de expressão dos genes de biossíntese de prolina (*CqP5CS1*, *CqP5CS1*, *CqproDH1*, *CqproDH2* e *CqOAT*) para promover o acúmulo de prolina, melhorando a tolerância à seca (Zhou et al., 2024). O EBR também aumentou o conteúdo de prolina em plantas de tabaco (*Nicotiana tabacum* L.) em condições de déficit hídrico, correlacionado com a maior expressão do gene *P5CS1* que está envolvido com a biossíntese de prolina (Khan et al., 2022).

A aplicação foliar de 24-epibrassinolídeo melhorou o estado hídrico das folhas e manteve a eficiência fotoquímica máxima do fotossistema II, reduzindo os danos causados à membrana celular e o estresse oxidativo em plantas de soja na fase vegetativa sob déficit hídrico (Silva et al., 2023).

2.4 Métodos de aplicação de brassinosteróide (BR)

O método de aplicação de BRs mais utilizado é a aplicação foliar, o qual tem se caracterizado como um método na mitigação dos efeitos negativos causados pelo estresse por falta de água em diferentes culturas, como a cultura do feijão-caupi (Gholami et al., 2023). No entanto, o método de embebição de sementes com BRS tem se destacado pelos resultados observados em diferentes culturas. A embebição de sementes é uma técnica de tratamento pré-semeadura usada em diferentes culturas para melhorar a germinação das sementes, o vigor de mudas, o crescimento e desenvolvimento, além de mitigar os efeitos negativos de estresses abióticos e bióticos (Saha et al., 2022; Soliman et al., 2020)

O método de embebição com o brassinolídeo (brassinosteróide) em sementes de amendoim (*Arachis hypogaea* L.) pode induzir maior tolerância à seca e aumentar os componentes de produção das plantas, número de vagens por planta e o peso de cem grãos, por meio da regulação da expressão gênica na transdução de sinal hormonal e na fotossíntese (Huang et al., 2020). Na cultura do milho (*Zea mays* L.), a embebição das sementes com 24-

epibrassinolídeo promoveu o desenvolvimento de raízes primárias, laterais e aéreas e aumentou a área radicular para a absorção de água e nutrientes (Zhang *et al.*, 2022).

Já a aplicação foliar de 24-epibrassinolídeo (EBR) aumentou a produção de sementes de plantas de feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) sob condições de escassez hídrica com o aumento da atividade fotossintética (Mohammadi *et al.*, 2019). Aplicações foliares de BRs em plantas de lulo (*Solanum quitoense* Lam) em condição de déficit hídrico melhoraram variáveis fisiológicas das plantas, como a eficiência fotoquímica do PSII, e bioquímicas como a concentração total de clorofila e carotenoides (Castañeda-Murillo *et al.*, 2022). A aplicação foliar de brassinolídeo em plantas de palma (*Opuntia ficus-indica* L.), que crescem normalmente em regiões áridas e semiáridas, aumentou a produtividade e a qualidade dos frutos e do óleo das sementes, além de antecipar a colheita em comparação ao controle (Atteya *et al.*, 2022). Resultado semelhante foi observado na cultura do morango (*Fragaria ananassa*) em sistema semi-hidropônico exposta ao déficit hídrico e salino em que aplicação foliar de brassinosteroides (BB16 e EP24) aumentou a produção de frutos por planta e número de frutos comercializáveis (Furio *et al.*, 2022). A aplicação foliar de 1,0 mg L⁻¹ de 24-epibrassinolídeo facilitou significativamente o ajuste osmótico em plantas de mamão submetidas a condição hídrica de 80% da ET₀ (Sousa *et al.*, 2026).

A avaliação de três métodos de aplicação de BRs (embebição de sementes, aplicação foliar e via solo) nas culturas soja (*Glycine max* L.), feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) e amendoim (*Arachis hypogaea* L.) sob condições ideais de crescimento e desenvolvimento, todos os métodos tiveram resultados positivos nos parâmetros morfológicos, fisiológicos e de rendimento, contudo, a aplicação foliar se sobressaiu aos demais em todos os parâmetros do feijoeiro (Mota *et al.*, 2023).

REFERÊNCIAS

- ABEBE, Belete Kuraz; ALEMAYEHU, Mulugeta Tesfaye. **A review of the nutritional use of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) for human and animal diets.** *Journal of Agriculture and Food Research* Elsevier B.V., , 1 dez. 2022.
- ATTEYA, Amira K. G. *et al.* Brassinolide Maximized the Fruit and Oil Yield, Induced the Secondary Metabolites, and Stimulated Linoleic Acid Synthesis of *Opuntia ficus-indica* Oil. *Horticulturae*, v. 8, n. 5, 1 maio 2022.
- AVALBAEV, Azamat *et al.* 24-Epibrassinolide Reduces Drought-Induced Oxidative Stress by Modulating the Antioxidant System and Respiration in Wheat Seedlings. *Plants*, v. 13, n. 2, 1 jan. 2024.

BARROS, Juliane Rafaela Alves *et al.* Water restriction in different phenological stages and increased temperature affect cowpea production. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 45, p. 1–12, 2021.

BARROS, Juliany M. T. Moura *et al.* 24-Epibrassinolide in the Flowering Stage Mitigates the Effects of Temporary Drought Stress and Favors the Post-stress Recovery in Soybean. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 42, n. 11, p. 7038–7053, 1 nov. 2023.

CAMPOS, Francilene Leonel; RIBEIRO, Valdenir Queiroz; ROCHA, Maurisrael. **Ciclo fenológico em caupi (Vigna unguiculata L.Walp.): uma proposta de escala de desenvolvimento Universidade Federal do Delta do Parnaíba**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/307478439>>.

CASTAÑEDA-MURILLO, Cristian Camilo *et al.* Foliar brassinosteroid analogue (DI-31) sprays increase drought tolerance by improving plant growth and photosynthetic efficiency in lulo plants. **Heliyon**, v. 8, n. 2, 1 fev. 2022.

FERREIRA, Denilson P. *et al.* Cowpea ecophysiological responses to accumulated water deficiency during the reproductive phase in Northeastern Pará, Brazil. **Horticulturae**, v. 7, n. 5, 1 maio 2021.

FREIRE FILHO, Francisco Rodrigues *et al.* **Crop Breeding and Applied Biotechnology Brazilian Society of Plant Breeding. Printed in Brazil “BRS Guariba”: white-grain cowpea cultivar for the mid-north region of Brazil** **Crop Breeding and Applied Biotechnology**. [S.l.: S.n.].

FREITAS, Rômulo Magno Oliveira de *et al.* Physiological responses of cowpea under water stress and rewatering in no-tillage and conventional tillage systems. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 3, p. 559–567, 2017.

FURIO, Ramiro N. *et al.* Brassinosteroid Applications Enhance the Tolerance to Abiotic Stresses, Production and Quality of Strawberry Fruits. **Horticulturae**, v. 8, n. 7, 1 jul. 2022.

GHOLAMI, Faride *et al.* Assessing the effects of 24-epibrassinolide and yeast extract at various levels on cowpea’s morphophysiological and biochemical responses under water deficit stress. **BMC Plant Biology**, v. 23, n. 1, 1 dez. 2023.

grove1979. [S.d.].

GUIMARÃES, Joana Bagoim *et al.* Genetic Diversity and Population Structure of Cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) Landraces from Portugal and Mozambique. **Plants**, v. 12, n. 4, 1 fev. 2023.

HUANG, Luping *et al.* Brassinosteroid priming improves peanut drought tolerance via eliminating inhibition on genes in photosynthesis and hormone signaling. **Genes**, v. 11, n. 8, p. 1–23, 1 ago. 2020.

KHAMSUK, Ornusa *et al.* Effects of 24-epibrassinolide and the synthetic brassinosteroid mimic on chili pepper under drought. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 40, n. 6, 1 jun. 2018.

KHAN, Imran *et al.* Effects of 24-epibrassinolide on plant growth, antioxidants defense system, and endogenous hormones in two wheat varieties under drought stress. **Physiologia Plantarum**, v. 172, n. 2, p. 696–706, 1 jun. 2021.

- LIMA, J. V.; LOBATO, A. K. S. Brassinosteroids improve photosystem II efficiency, gas exchange, antioxidant enzymes and growth of cowpea plants exposed to water deficit. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 23, n. 1, p. 59–72, 1 jan. 2017.
- LIU, Chunjuan *et al.* Exogenous brassinosteroids increases tolerance to shading by altering stress responses in mung bean (*Vigna radiata* L.). **Photosynthesis Research**, v. 151, n. 3, p. 279–294, 1 mar. 2022.
- MAIA JÚNIOR, S. de Oliveira. de Andrade, Jailma Ribeiro *et al.* Seed Priming with Brassinosteroids Mitigates Pre-Flowering Drought Stress in Soybean Varieties. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 25, n. 2, p. 3545–3560, 1 jun. 2025.
- MAIA JÚNIOR, Sebastião de Oliveira *et al.* Seed Priming with Brassinosteroids Mitigates Pre-Flowering Drought Stress in Soybean Varieties. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 25, n. 2, p. 3545–3560, 1 jun. 2025.
- MOHAMMADI, Mahsa *et al.* Improvement in photosynthesis, seed yield and protein content of common bean (*Phaseolus vulgaris*) by foliar application of 24-epibrassinolide under drought stress. **Crop and Pasture Science**, v. 70, n. 6, p. 535–545, 2019.
- MOHAMMADI, Mahsa *et al.* Study the effect of 24-epibrassinolide application on the Cu/Zn-SOD expression and tolerance to drought stress in common bean. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 26, n. 3, p. 459–474, 1 mar. 2020.
- MOTA, M. M.; VAN DER WATT, E.; KHETSHA, Z. P. Foliar application of brassinosteroids improves the yield and morpho-physiological characteristics of *arachis hypogaea* L., *glycine max* (L.), and *phaseolus vulgaris* L. **Applied Ecology and Environmental Research**, v. 22, n. 1, p. 355–371, 2024.
- OSAKABE, Yuriko *et al.* Response of plants to water stress. **Frontiers in Plant Science** Frontiers Research Foundation, , 13 mar. 2014.
- PEREZ-BORROTO, Lucia Sandra *et al.* A brassinosteroid functional analogue increases soybean drought resilience. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, 1 dez. 2022.
- RODRIGUES, Ana P. *et al.* Uncovering the wide protective responses in *Coffea* spp. leaves to single and superimposed exposure of warming and severe water deficit. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 2023.
- SAHA, Debanjana *et al.* Drought stress responses and inducing tolerance by seed priming approach in plants. **Plant Stress**, v. 4, 1 abr. 2022.
- SIDDIQI, Khwaja Salahuddin; HUSEN, Azamal. Significance of brassinosteroids and their derivatives in the development and protection of plants under abiotic stress. *[S.d.]*.
- SILVA, André Lucas Januário *et al.* 24-Epibrassinolide promotes activation of physiological compensation mechanisms in response to drought stress and rehydration and improves yield in soybean. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 209, n. 3, p. 355–370, 1 jun. 2023.
- SILVA, Aminthia Pombo Sudré da *et al.* **Brassinosteroids: Relevant Evidence Related to Mitigation of Abiotic and Biotic Stresses in Plants.** **Agronomy** Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 abr. 2024.

SOLIMAN, Mona *et al.* Brassinosteroid seed priming with nitrogen supplementation improves salt tolerance in soybean. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 26, n. 3, p. 501–511, 1 mar. 2020.

SOUSA, D. J. P. *et al.* Mitigation of the effects of salt stress in cowpea bean through the exogenous application of brassinosteroid. **Brazilian Journal of Biology**, v. 82, 2022.

SOUSA, Valéria Fernandes de Oliveira *et al.* Exogenous brassinosteroid mitigates water deficit in papaya plants by enhancing photosynthetic pigment and sugar content. **South African Journal of Botany**, v. 188, p. 282–294, 1 jan. 2026.

WANG, Zhizhen *et al.* Effect of exogenous 24-epibrassinolide on chlorophyll fluorescence, leaf surface morphology and cellular ultrastructure of grape seedlings (*Vitis vinifera* L.) under water stress. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 37, n. 1, 1 jan. 2015.

ZANON DE MOURA, Jaqueline *et al.* ESCALA DE DESENVOLVIMENTO FENOLÓGICO E EXIGÊNCIA TÉRMICA ASSOCIADA A GRAUS-DIA DO FEIJÃO-CAUPI 1. **Revista Caatinga**, v. 25, n. 3, p. 66–71, [S.d.].

ZENG, Guihua *et al.* 24-epibrassinolide enhances drought tolerance in grapevine (*Vitis vinifera* L.) by regulating carbon and nitrogen metabolism. **Plant Cell Reports**, v. 43, n. 9, 1 set. 2024.

ZHANG, Hao *et al.* Exogenous brassinosteroids promotes root growth, enhances stress tolerance, and increases yield in maize. **Plant Signaling and Behavior**, v. 17, n. 1, 2022.

ZHOU, Qi *et al.* Effects of Different Drought Degrees on Physiological Characteristics and Endogenous Hormones of Soybean. **Plants**, v. 11, n. 17, 1 set. 2022.

ZHOU, Ya Li *et al.* Exogenous 24-Epibrassinolide Enhanced Drought Tolerance and Promoted BRASSINOSTEROID-INSENSITIVE2 Expression of Quinoa. **Plants**, v. 13, n. 6, 1 mar. 2024.

CAPÍTULO II

MÉTODOS DE APLICAÇÃO DE BRASSINOSTEROIDE EM *Vigna unguiculata* L. SOB CONDIÇÕES DE DÉFICIT HÍDRICO

Artigo nas normas do periódico: Acta Physiologiae Plantarum

RESUMO

O déficit hídrico é um estresse abiótico que reduz a atividade fotossintética e, conseqüentemente, prejudica o crescimento e o desenvolvimento de plantas. A aplicação exógena de brassinosteroides (BRs) mitiga os efeitos negativos desse estresse. Este estudo avaliou os efeitos de métodos de aplicação de brassinosteróide no cultivo do feijão-caupi em condições de déficit hídrico. Foi utilizado o análogo de brassinosteróide 24-epibrassinolídeo (EBR). O experimento foi realizado em esquema fatorial 2 x 4, com duas condições hídricas (plantas irrigadas e sob déficit hídrico); e quatro métodos de aplicação de brassinosteroides (controle, embebição de sementes, aplicação foliar e embebição de sementes + aplicação foliar), com quatro repetições. O conteúdo relativo de água e o armazenamento de água na folha reduziram nas plantas de feijão-caupi submetidas ao déficit hídrico. Observou-se, aos três dias após o estresse (3 DAE), aumento significativo tanto do conteúdo de prolina quanto dos carotenoides nas plantas do tratamento com embebição em condições de déficit hídrico. Os componentes de produção comprimento de vagem (CV) e o peso médio de vagens (PV) foram menores apenas nas plantas controle em condições de déficit hídrico. O número de vagens por planta (NVP) foi menor nas plantas com restrição hídrica. No entanto, o NVP foi maior nas plantas com o tratamento embebição em relação às plantas controle na mesma condição de déficit hídrico. O peso das sementes foi maior das plantas dos tratamentos embebição e embebição + aplicação foliar sob déficit hídrico. Esses resultados podem servir como base para novos estudos em outras culturas de interesse agrícola, bem como do feijão em condições de campo.

Palavras-chave: 24-epibrassinolídeo. Estresse hídrico. Extravazamento de eletrólitos. Ajuste osmótico.

ABSTRACT

Water deficit is an abiotic stress that reduces photosynthetic activity and, consequently, impairs plant growth and development. Exogenous application of brassinosteroids (BRs) mitigates the negative effects of this stress. This study evaluated the effects of brassinosteroid application methods on cowpea cultivation under water deficit conditions. The brassinosteroid analog 24-epibrassinolide (EBR) was used. The experiment was conducted in a 2 x 4 factorial design, with two water conditions (irrigated plants and plants under water deficit); and four brassinosteroid application methods (control, seed soaking, foliar application, and seed soaking + foliar application), with four replications. The relative water content and water storage in the leaf decreased in cowpea plants subjected to water deficit. Three days after stress (3 DAE), a significant increase in both proline and carotenoid content was observed in plants treated with soaking under water deficit conditions. The yield components pod length (PL) and average pod weight (AW) were lower only in control plants under water deficit conditions. The number of pods per plant (NPP) was lower in plants with water restriction. However, the NPP was higher in plants with the soaking treatment compared to control plants under the same water deficit condition. Seed weight was higher in plants from the soaking and soaking + foliar application treatments under water deficit. These results can serve as a basis for further studies in other crops of agricultural interest, as well as in beans under field conditions.

Keywords: 24-epibrassinolide. Water stress. Electrolyte leakage. Osmotic adjustment.

INTRODUÇÃO

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp.) é uma cultura de origem africana de grande importância socioeconômica para região Nordeste do Brasil. Entre as várias cultivares disponíveis no mercado, provenientes da espécie *Vigna unguiculata* (L.) Walp., pode-se destacar a BRS Guariba, destinada à produção de grãos secos, a qual é moderadamente tolerante à seca (Freire Filho *et al.* 2006), fato interessante em decorrência das mudanças climáticas.

No cenário atual, as mudanças climáticas, tem como consequência o aumento da temperatura e a escassez hídrica que podem afetar a fenologia e reduzir o crescimento e a produtividade de plantas de feijão-caupi (Barros *et al.* 2021). Quando não há água suficiente no solo, as plantas diminuem a abertura estomática para evitar a perda de água, limitando a absorção de CO₂, o que afeta o crescimento e o desenvolvimento das plantas devido à redução do processo de fotossíntese, incluindo danos ao fotossistema II (Siddiqi and Husen 2021; Osakabe *et al.* 2014). Além disso, o déficit hídrico altera a turgescência das plantas por meio da redução do conteúdo relativo de água, além da síntese e conteúdo de prolina que atua no ajustamento osmótico das plantas, contribuindo na absorção de água mesmo sob desidratação (Pinheiro *et al.* 2025).

Diante do exposto, medidas de mitigação do déficit hídrico estão sendo amplamente utilizadas, a exemplo do uso de biorreguladores, como os brassinosteroides que se apresenta como uma alternativa promissora para mitigação dos efeitos negativos do déficit hídrico em diferentes espécies de plantas. Os brassinosteroides (BRs) são um grupo de hormônios esteroides vegetais naturais que regulam vários processos fisiológicos e de desenvolvimento das plantas e são sintetizados em resposta aos estresses bióticos e abióticos, incluindo a restrição hídrica (Liu *et al.* 2022; Silva *et al.* 2024).

Sob condições de déficit hídrico a aplicação de BRs aumenta a eficiência quântica máxima do fotossistema II (PSII), o conteúdo de clorofilas e carotenoides, estimula a síntese de prolina e reduz o extravasamento de eletrólitos, contribuindo para a manutenção da atividade fotossintética das plantas (Lima and Lobato 2017; Mohammadi *et al.* 2019; Castañeda-Murillo *et al.* 2022). Nas mesmas condições, o brassinosteroide 24-epibrassinolídeo aumentou os pigmentos fotossintéticos (clorofila a, clorofila b e total) e o conteúdo de carotenoides, e reduziu os efeitos de compostos oxidantes em plantas de feijão-caupi (Lima and Lobato 2017). Contudo, o método de aplicação de BRS pode influenciar sua ação no aumento da tolerância das plantas aos estresses abióticos (Silva *et al.* 2024). A embebição de sementes com BRs é um método de tratamento pré-semeadura que pode induzir maior tolerância à seca e aumentar os

componentes de produção de plantas sob déficit hídrico (Huang et al. 2020). Já a aplicação foliar de BRs pode aumentar a atividade fotossintética de plantas em condições de déficit hídrico (Mohammadi et al. 2019). No entanto, os efeitos de diferentes métodos de aplicação de brassinosteroides sobre as respostas das plantas de feijão-caupi sob déficit hídrico permanecem desconhecidas.

Nossa hipótese é que a aplicação de EBR por meio da embebição das sementes pode reduzir os danos causados pelo déficit hídrico em plantas de feijão-caupi ao mitigar os impactos no estado hídrico, aumentando o acúmulo de prolina e a integridade das membranas. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos de métodos de aplicação de brassinosteróide em *Vigna unguiculata* L. em condições de déficit hídrico.

MATERIAL E MÉTODOS

Localização do experimento, material vegetal e condições de crescimento

O experimento ocorreu entre os meses de outubro e dezembro de 2024, e realizado em casa de vegetação pertencente ao Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias (PPGCIAG), da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), localizada em São Luís, Maranhão.

As sementes utilizadas foram de *Vigna unguiculata* (L.) Walp. BRS Guariba. Desde a semeadura até a fase produtiva, as plantas foram cultivadas em vasos plásticos com capacidade para 20 L (litros). Os vasos foram preenchidos com solo naturalmente seco e com adição de substrato comercial da marca Carolina Soil (20:2; p:v). O solo foi coletado na Universidade Estadual do Maranhão, Campus Paulo VI, São Luís, e, posteriormente, foi realizada a análise de solo em laboratório (Matéria Orgânica = 15 g/dm³; pH = 3,5; P = 6 mg/dm³; K = 0,7 mmolc/dm³; Ca = 6 mmolc/dm³; Mg = 7 mmolc/dm³; CTC = 46,7 mmolc/dm³). O manejo da adubação foi feito de acordo com o método de Novais et al. (1991), aplicando-se 100, 300 e 150 mg/Kg⁻¹ de solo de N, P e K, respectivamente. Aos 25 DAS foi aplicada uma solução fertilizante de macro e micronutrientes diluída na proporção 5g por 10 L de água, adicionando-se 1L por vaso. Em cada vaso plástico foram semeadas oito sementes, e dez dias após a semeadura (DAS) foi realizado o desbaste das plantas, e cada vaso ficou com duas plantas mais vigorosas. Conforme o crescimento das plantas, foi necessário fazer o tutoramento, que foi realizado com fitilho (Nylon).

Tratamentos e Delineamento experimental

O experimento foi realizado em esquema fatorial 2 x 4 com delineamento em blocos casualizados, totalizando oito tratamentos com quatro repetições, 32 unidades experimentais, com duas plantas em cada unidade. As plantas de feijão-caupi foram submetidas a duas condições hídricas (controle e déficit hídrico); e quatro métodos de aplicação do bioregulador vegetal brassinosteróide (controle – C; embebição de sementes – E; aplicação foliar – AF; e embebição de semente + aplicação foliar - E+AF), como mostrado na Figura 1. A concentração de brassinosteróide 100 nM (0,1 µM) utilizada foi determinada de acordo com os resultados do estudo de Lima e Lobato (2017).

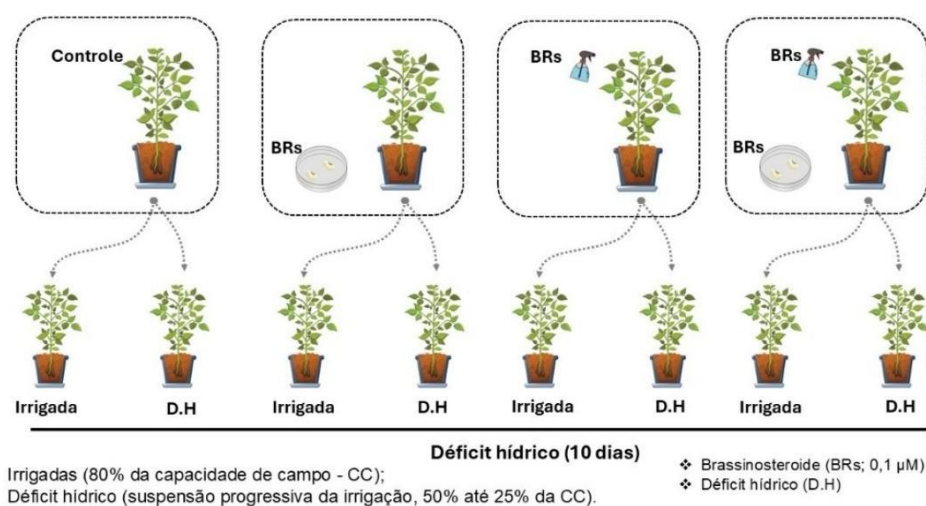


Fig. 1 Desenho experimental: duas condições hídricas (controle e déficit hídrico); e quatro métodos de aplicação do bioregulador vegetal brassinosteróide (controle, embebição de sementes, aplicação foliar e embebição de semente + aplicação foliar).

Preparação e aplicação de 24-epibrassinolídeo

O biorregulador vegetal utilizado foi o 24-epibrassinolídeo (EBR) da marca comercial PhytoTech Labs[®], um análogo de brassinosteróide. O 24-epibrassinolídeo foi dissolvido em etanol e água destilada para a obtenção da solução estoque e, em seguida, diluído em água destilada para a concentração desejada de 0,1 µM (Lima; Lobato, 2017b; Maia Júnior et al., 2025b).

Para o método de embebição, foram selecionadas 200 sementes, embebidas em 200 mL de EBR (0,1 µM) durante 6 h em temperatura ambiente (Soliman et al., 2020; Sousa et al.,

2022). Em seguida, as sementes foram colocadas sobre papel-toalha para secar em temperatura ambiente durante 1h, e em seguida foram semeadas.

A aplicação foliar de EBR ocorreu aos 20, 25 e 31 dias após a semeadura (DAS), e as quantidades aplicadas variaram conforme o crescimento das plantas, sendo 500 mL, 1.000 mL e 1.700 mL, respectivamente. Quando foi realizada a última aplicação (31 DAS), as plantas iniciavam estágio fenológico reprodutivo, com surgimento dos primeiros botões florais. O biorregulador foi aplicado com um pulverizador manual. As aplicações foram feitas nas partes adaxial e abaxial das folhas ao final da tarde. Estruturas adaptadas foram montadas para evitar a aspersão para as unidades adjacentes quando ocorreram as aplicações com EBR. Tanto para a embebição quanto para aplicação foliar foi utilizada Tween 0,01% como surfactante.

Imposição dos regimes hídricos

O manejo da irrigação foi realizado com base nas leituras do sensor de umidade TDR-315H, Acclima, Idaho, USA, que era inserido no centro dos vasos. Após o preenchimento dos vasos com solo seco ao ar livre, eles foram pesados (PS) e, por meio do sensor, obteve-se a leitura do solo seco (LSS). Posteriormente, os vasos foram saturados e pesados para a obtenção do peso úmido (PU) e da leitura do solo úmido (LSU), após a drenagem livre. A diferença entre PS e PU correspondeu à capacidade de armazenamento de água no vaso (CAV). Considerou-se que 1,0 g equivale a 1 mL de capacidade de armazenamento de água nos vasos (Morales et al. 2015). Durante o período de restrição hídrica, a água foi reposta conforme os tratamentos hídricos e com base nas leituras. Esses tratamentos consistiram em um grupo de plantas irrigadas (aproximadamente 80% da capacidade de campo - CC) e outro de plantas sob déficit hídrico (suspensão gradativa da irrigação, 50% até 25% da CC).

O cálculo do volume de água a ser reposto na irrigação foi realizado por:

$$V = \{[(LSU - LSS) \times T/100 + LSS] - LD\} \times QA \quad (\text{equação 1})$$

$$QA = [CAV / (LSU - LSS)] \times 1000 \quad (\text{equação 2})$$

Em que: V= volume em ml; LSU= leitura de umidade do solo úmido (%); com o sensor TDR-315H; LSS= leitura de umidade do solo seco (%); T= níveis de reposição de água com base na capacidade de campo (80%, 50% e 25% CC); LD= leitura diária com o sensor (%);

CAV= capacidade de armazenamento de água no vaso, dada em L; e QA= quantidade de água por cada porcentagem de umidade do solo.

As plantas de feijão-caupi foram irrigadas próximo a capacidade de campo (80% CC) até os 35 DAS, momento em que se iniciou o período de déficit hídrico com a suspensão progressiva da irrigação. O déficit hídrico ocorreu na fase de florescimento das plantas, estágio fenológico reprodutivo (Campos; Ribeiro; Rocha, 2000; De Moura et al. 2012). Durante 10 dias, as plantas foram submetidas a duas condições hídricas: irrigadas (capacidade de campo 80%, durante todo o ciclo das plantas) e déficit hídrico progressivo (50% da capacidade de campo até o terceiro dia; e 25% da capacidade de campo do quarto até o décimo dia) (Tabela 1). Após esse período de déficit hídrico, a irrigação foi retomada em todas as unidades experimentais próxima a capacidade de campo de 80%.

Tabela 1 Regime hídrico das plantas de feijão-caupi no período déficit hídrico.

Avaliações	0 DAE	3 DAE	6 DAE	10 DAE
Período (DAS)	35	38	41	45
CC	80%	50%	25%	25%

DAS= dias após a sementeira. DAE = dias após o estresse.. CC= capacidade de campo.

Avaliações Fisiológicas e Componentes de Produção

As avaliações fisiológicas ocorreram nos períodos 3, 6, e 10 após o início do estresse (DAE). As variáveis de produtividade foram quantificadas no final do ciclo das plantas na casa de vegetação.

Estado hídrico das plantas

Foram avaliadas as seguintes características de relações hídricas: conteúdo relativo de água (CRA), armazenamento de água na folha (AAF) e déficit de saturação de água (DSA).

Para avaliar o CRA foram utilizados dez discos de 0,6 cm de diâmetro, retirados dos folíolos da quinta folha expandida, contada do ápice para a base das plantas. Os discos foram pesados, obtendo-se a massa fresca (MF). Em seguida, os discos foram colocados em recipientes com água destilada, durante 24 horas, para obtenção da massa túrgida (MT). Para

quantificar a massa seca (MS), os discos foram acondicionados em sacos de papel e colocados em estufa a 65 °C durante 24 horas. O conteúdo relativo de água foi calculado por meio da fórmula (1962):

$$\text{CRA} = (\text{MF} - \text{MS}) / (\text{MT} - \text{MS}) \times 100$$

O armazenamento de água na folha por área (AAF) foi determinado como: AAF (mL H₂O cm⁻²) = (M1–M2)/S (Yamani *et al.* 2020). O peso fresco de um folíolo (M1) da quinta folha expandida, contada do ápice para a base das plantas, foi determinado após o corte. Em seguida o mesmo folíolo foi colocado em estufa de circulação de ar para secar a 65°C por 24h, e mais uma vez pesado (M2). Foi determinada a superfície do folíolo (S) assimilada a uma elipse ($S = 3,14 \times a \times b / 4$, onde a e b são comprimento e largura do folíolo, respectivamente).

O DSA foi determinado como um parâmetro complementar ao conteúdo de água com base no conteúdo de água na pressão de turgor total, conforme segue: DSA (%) = (MT - MF)/(MT - MS) × 100 (Ye *et al.* 2022).

Conteúdo de prolina

O conteúdo de prolina foi quantificado de acordo com o estudo de Bates *et al.* (1973). A massa foliar foi obtida do folíolo da quinta folha expandida, contada do ápice para a base das plantas. Utilizaram-se 0,05 g de massa foliar seca e 2 mL de ácido sulfossalicílico (3%) para a obtenção do extrato. Em tubos de ensaio, foram adicionadas alíquotas de 100 µL do extrato, 1 mL de reagente de ninhidrina ácida e 1 mL de ácido acético glacial (98%). Os tubos foram agitados em vórtex e levados ao banho-maria por 1 hora a 100 °C e, em seguida, foram colocados em banho de gelo, durante 10 minutos, para interromper a reação. Adicionou-se à solução 2 mL de tolueno (97%) e os tubos foram agitados em vórtex novamente. Aspirou-se o cromóforo contendo tolueno da fase aquosa para a leitura em espectrofotômetro à 520 nm, utilizando-se tolueno como padrão. A concentração de prolina (µmol g⁻¹ MS) foi determinada a partir de curva padrão de L-prolina.

Extravasamento de eletrólitos (EE)

O extravasamento de eletrólitos (EE) foi determinado usando 10 discos com cerca de 0,6 cm de diâmetro, retirados do folíolo da quinta folha expandida, contada do ápice para a base das plantas. Os discos foram colocados em frascos de vidro contendo 30 ml de água deionizada à temperatura ambiente por 24 h. Em seguida, a condutividade elétrica da solução (EC1) foi medida e os frascos de vidro contendo os discos foliares foram autoclavados a 90 °C por 2 h. Após o resfriamento, a condutividade elétrica final (EC2) foi medida. A porcentagem de EE foi calculada da seguinte forma: $EE (\%) = (EC1/EC2) \times 100$ (Campos et al. 2003).

Conteúdo de pigmentos fotossintetizantes

Para quantificar os conteúdos de clorofila *a*, *b* e os carotenoides, utilizou-se discos de 0,6 cm de diâmetro dos folíolos da quinta folha expandida, contada do ápice para a base das plantas. Os discos foram pesados e acondicionados em tubos de ensaio protegidos com papel alumínio contendo 5 ml de acetona a 80% durante 48 horas. Posteriormente, foram realizadas as leituras de absorvância dos extratos a 480, 645 e 663 nm de comprimento de onda, em espectrofotômetro (Arnon, 1949; Lichtenthaler, 1987). Os conteúdos de clorofila *a*, *b* e os carotenoides foram calculados como descrito por Lichtenthaler (1987), e expressos em mg g⁻¹ de massa fresca (MF). Posteriormente, o conteúdo de clorofila total foi calculado pela soma *a* + *b*.

Fluorescência da clorofila *a*

A eficiência quântica máxima (F_v/F_m) do Fotossistema II (PSII) foi avaliada entre às 10h e 12h com o fluorímetro modelo Pocket PEA (Hansatech, Norfolk, UK), durante o período de déficit hídrico (3, 6 e 10 DAE). Os folíolos da quinta folha trifoliada expandida, contada do ápice para a base das plantas, foram adaptados ao escuro durante 30 minutos por meio de cliques específicos que foram colocados na parte intermediária da folha, evitando-se a nervura central.

Variáveis de produtividade

Quando as plantas atingiram o estágio de maturação, aos 49 DAS, iniciou-se a colheita das vagens, que foi finalizada aos 63 DAS, ao final do experimento. Os componentes de produção analisados foram os seguintes: comprimento de vagem (CV), peso médio de vagem

(PV), peso de sementes por vagem (PSV), número de vagens por planta (NVP), número de sementes por planta (NSP), e peso de cem sementes (P100).

Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F sendo as médias dos regimes hídricos e dos métodos de aplicação de brassinosteroide comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, através do software SISVAR versão 5.6. Uma Análise de Componentes Principais foi realizada para visualizar as alterações causadas pelo estresse hídrico e os diferentes métodos de aplicação de EBR sobre as principais variáveis respostas das plantas de feijão, utilizando a plataforma R versão 4.1.3.

RESULTADOS

O conteúdo relativo de água (CRA) reduziu nas plantas de feijão-caupi sob condições de déficit hídrico em todo período avaliado, exceto aos 3 DAE no tratamento E+AF (Fig. 2). Contudo, no último dia de déficit hídrico o CRA foi menor para todas as plantas independentemente do método de aplicação de BR, principalmente, nas plantas controle que foi de 19,59% seguido de E, AF e E+AF que tiveram redução de 11,94%, 13,46% e 12,29%, respectivamente, em comparação as plantas irrigadas.

O armazenamento de água na folha (AAF) foi menor nas plantas de feijão-caupi submetidas ao período de déficit hídrico, salvo aos 3DAE nas plantas do tratamento AF (Fig. 2). Entretanto, no último dia de déficit, o AAF reduziu em todos os tratamentos. Nas plantas controle foi de 23,6%, e os tratamentos E, AF e E+AF tiveram reduções de 10,8%, 15,4% e 16,7%, respectivamente, em relação às plantas irrigadas.

O déficit de saturação de água (DAS) aumentou nas plantas de feijão-caupi com restrição hídrica, exceto aos 3DAE no tratamento E+A (Fig. 2). Todavia, no último dia do período de déficit hídrico, todos os tratamentos aumentaram o DAS, principalmente, nas plantas controle que aumentaram em 100,8%, enquanto nos E, AF e E+AF aumentaram 63,9%, 71,9% e 68,2%, respectivamente, comparadas às plantas irrigadas.

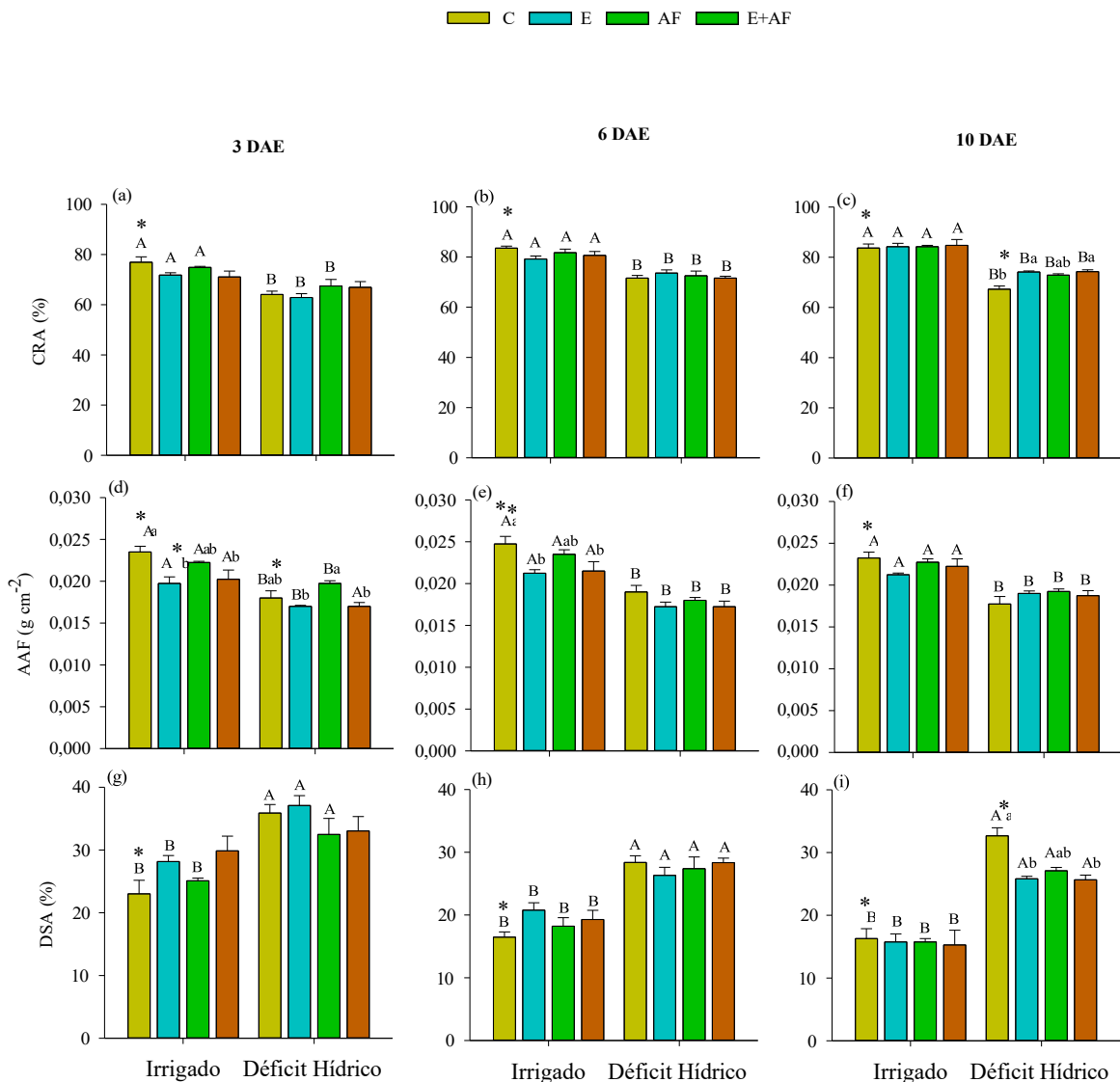


Fig. 2 Conteúdo relativo de água (CRA), Armazenamento de água na folha (AAF) e Déficit de saturação de água (DAS) e Razão peso fresco e peso seco (PF/PS) em plantas de feijão cultivadas sob duas condições de disponibilidade hídrica (irrigadas e déficit hídrico) e quatro métodos de aplicação de brassinosteróide (controle – sem BR (C), Embebição das sementes (E), Aplicação foliar (AF) e Embebição das sementes + Aplicação foliar (E+AF)). São mostrados os valores da média \pm erro padrão (n=4). DAE = dias após o estresse. * = significativo ($P < 0,05$). ** = significativo ($P < 0,01$). ns = não significativo. As letras maiúsculas iguais não diferem entre as condições hídricas para o mesmo método de aplicação de brassinosteróide. As letras minúsculas iguais não diferem entre os métodos de aplicação de brassinosteróide em cada condição hídrica ($P < 0,05$; Teste de Tukey).

O conteúdo de prolina aumentou, significativamente, aos 3 DAE nas plantas de feijão-caupi em condições de déficit hídrico com os tratamentos AF (149,9%), E+AF (60,2%), e as plantas com o tratamento E aumentou quatro vezes em comparação às plantas irrigadas (Fig. 3). Aos 6 DAE, os tratamentos AF e E+AF apresentaram menores conteúdos de prolina com redução de 27,9% e 43,2%, respectivamente, em relação às irrigadas. Já no último dia de déficit hídrico, os tratamentos C e E+AF apresentaram menores conteúdos de prolina, com redução de 37,2% e 34,7%, respectivamente, em relação às irrigadas.

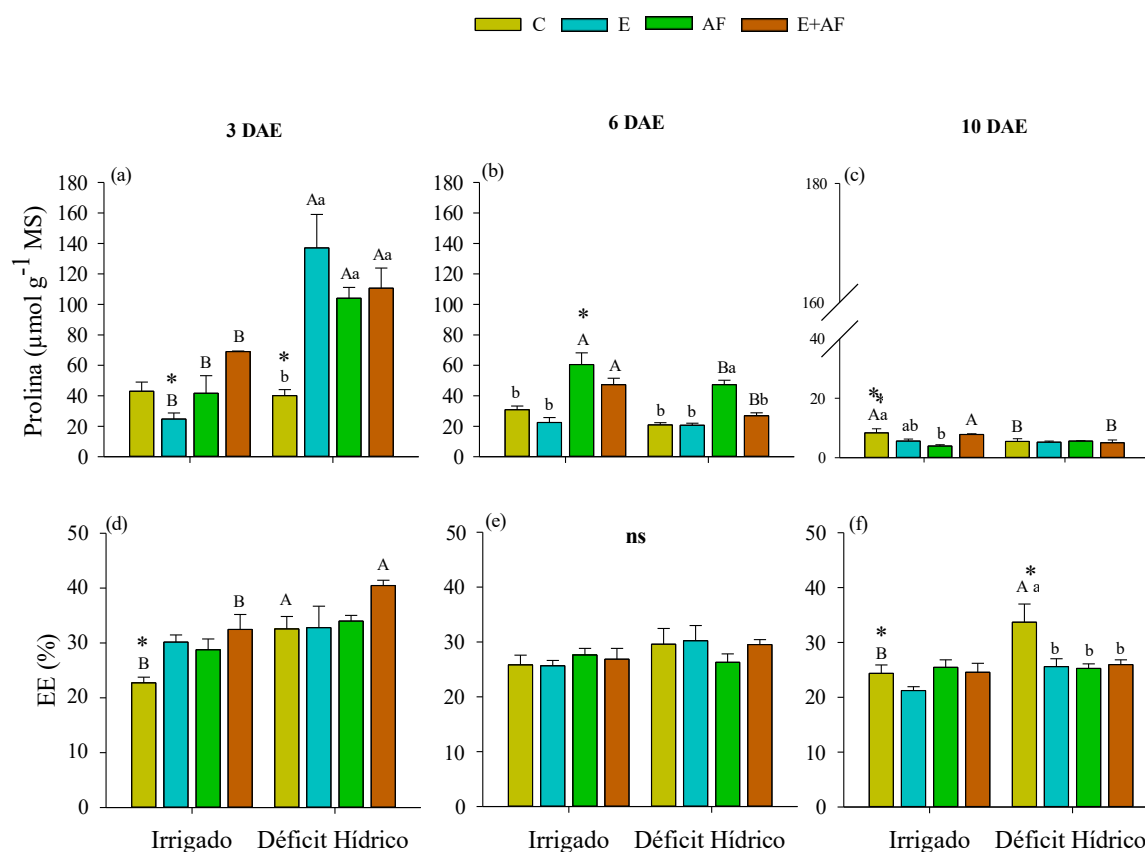


Fig. 3 Prolina e Extravasamento de eletrólitos (EE) em plantas de feijão cultivadas sob duas condições de disponibilidade hídrica (irrigadas e déficit hídrico) e quatro métodos de aplicação de brassinosteróide (controle – sem BR (C), Embebição das sementes (E), Aplicação foliar (AF) e Embebição das sementes + Aplicação foliar (E+AF)). São mostrados os valores da média \pm erro padrão (n=4). DAE = dias após o estresse. * = significativo ($P < 0,05$). ** = significativo ($P < 0,01$). ns = não significativo. As letras maiúsculas iguais não diferem entre as condições hídricas para o mesmo método de aplicação de brassinosteróide. As letras minúsculas iguais não diferem entre os métodos de aplicação de brassinosteróide em cada condição hídrica ($P < 0,05$; Teste de Tukey).

Aos 3 DAE, o extravasamento de eletrólitos aumentou 24,5% nas plantas do tratamento E+AF e 43,2% das plantas-controle em condições de déficit hídrico em relação às plantas irrigadas (Fig. 3). Contudo, no último dia de déficit hídrico, somente as plantas-controle submetidas ao déficit hídrico aumentaram o extravasamento de eletrólitos, 38,3% maior que as plantas irrigadas.

A clorofila *a* foi menor, durante o período de restrição hídrica, somente em plantas de feijão-caupi dos tratamentos E+AF, aos 6 DAE, e com o tratamento AF, aos 10 DAE, 18,7% e 19,6%, respectivamente, em relação às plantas irrigadas (Fig. 4). De forma semelhante, a clorofila *b* foi menor apenas em plantas do tratamento AF aos 10 DAE, 14,2% em comparação às plantas irrigadas. Por outro lado, aos 3 DAE, o conteúdo de carotenóides foi maior (59,1%) em plantas do tratamento E em condições de déficit hídrico em comparação às plantas irrigadas. No entanto, após esse período, não houve diferença entre os tratamentos para o conteúdo de carotenóides.

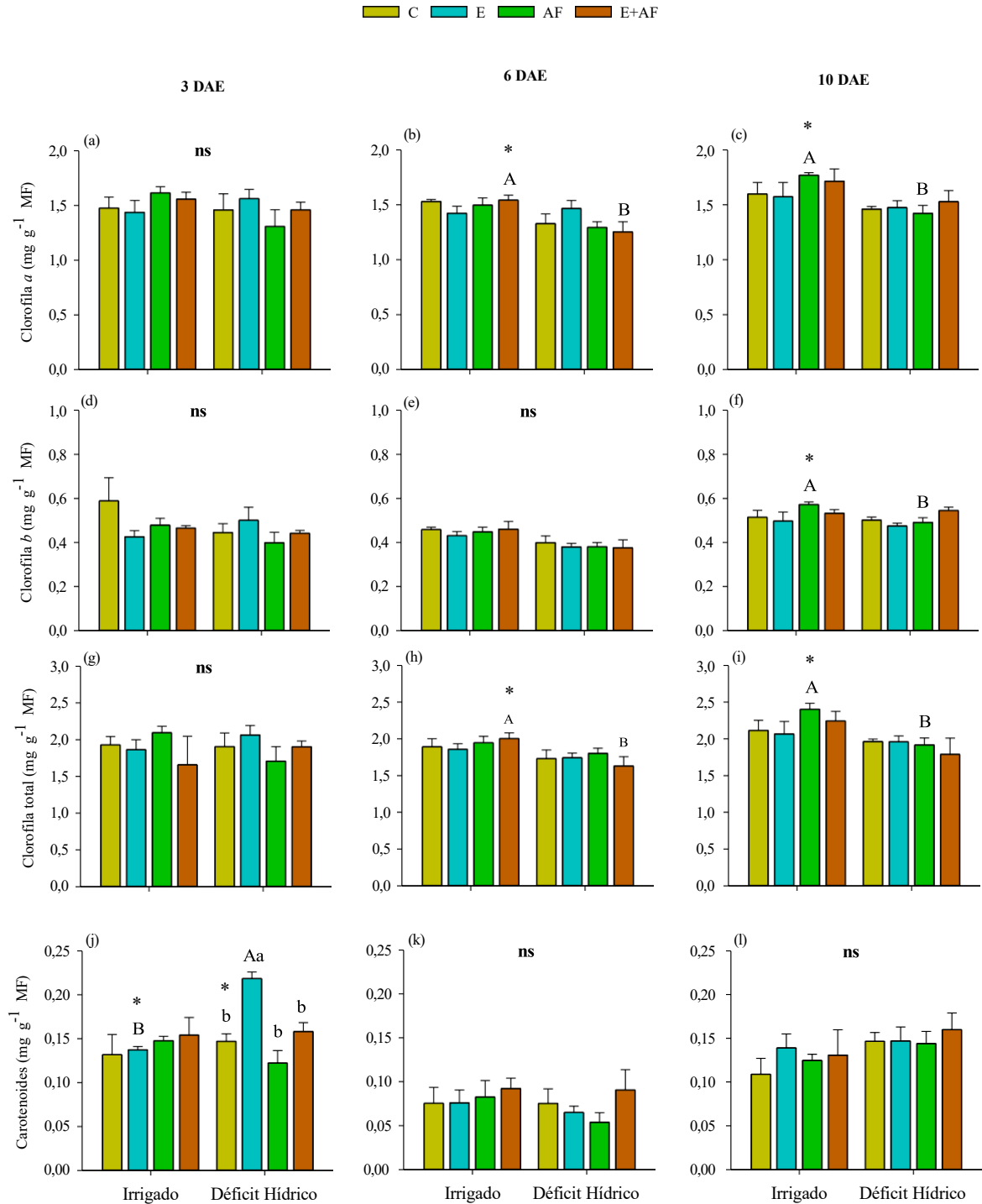


Fig. 4 Clorofila *a*, Clorofila *b*, Clorofila total e Carotenoides em plantas de feijão cultivadas sob duas condições de disponibilidade hídrica (irrigadas e déficit hídrico) e quatro métodos de aplicação de brassinosteróide (controle – sem BR (C), Embebição das sementes (E), Aplicação foliar (AF) e Embebição das sementes + Aplicação foliar (E+AF)). São mostrados os valores da média \pm erro padrão ($n=4$). DAE = dias após o estresse. * = significativo ($P < 0,05$). ** = significativo ($P < 0,01$). ns = não significativo. As letras maiúsculas iguais não diferem entre as condições hídricas para o mesmo método de aplicação de brassinosteróide. As letras minúsculas iguais não diferem entre os métodos de aplicação de brassinosteróide em cada condição hídrica ($P < 0,05$; Teste de Tukey).

Aos 3 DAE, a eficiência fotoquímica máxima do fotossistema II (F_v/F_m) foi menor nas plantas em condições de déficit hídrico dos tratamentos AF e E+AF em 6,23% e 5,31%, respectivamente, em comparação com as plantas irrigadas (Fig. 5). Contudo, no último dia de déficit hídrico, o F_v/F_m foi menor em todas as plantas submetidas em condições de déficit hídrico em relação às plantas irrigadas.

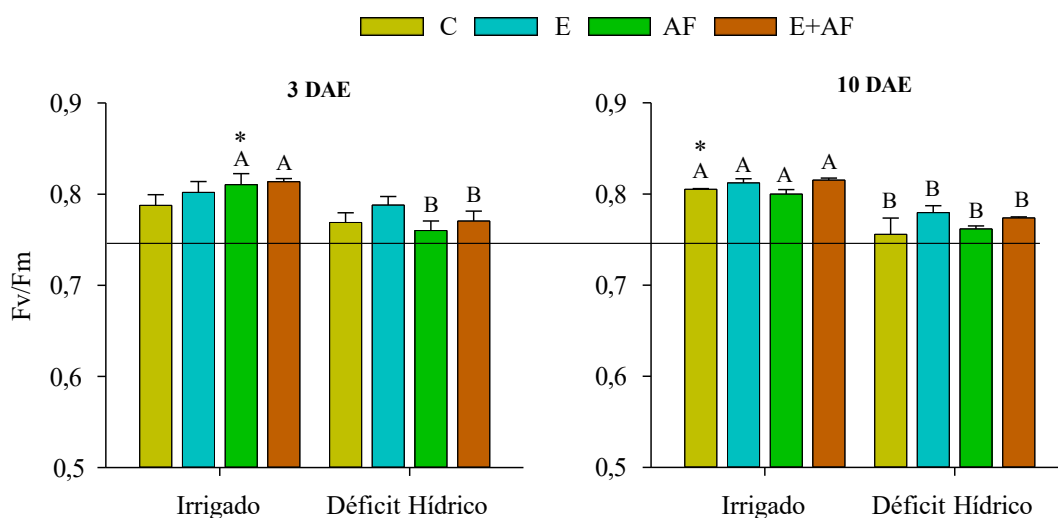


Fig. 5 Eficiência fotoquímica máxima do fotossistema II (F_v/F_m) em plantas de feijão cultivadas sob duas condições de disponibilidade hídrica (irrigadas e déficit hídrico) e quatro métodos de aplicação de brassinosteróide (controle – sem BR (C), Embebição das sementes (E), Aplicação foliar (AF) e Embebição das sementes + Aplicação foliar (E+AF)). São mostrados os valores da média \pm erro padrão ($n=4$). DAE = dias após o estresse. A linha na horizontal indica o valor de F_v/F_m 0,75. * = significativo ($P < 0,05$). ** = significativo ($P < 0,01$). ns = não significativo. As letras maiúsculas iguais não diferem entre as condições hídricas para o mesmo método de aplicação de brassinosteróide. As letras minúsculas iguais não diferem entre os métodos de aplicação de brassinosteróide em cada condição hídrica ($P < 0,05$; Teste de Tukey).

O comprimento de vagem (CV) das plantas em condições de déficit hídrico foi menor somente nas plantas controle, 6,01% em comparação às plantas irrigadas. Do mesmo modo, o peso de vagem (PV) foi menor 18,6% em condições de déficit hídrico nas plantas controle em comparação às plantas irrigadas. O número de vagens por planta (NVP) foi menor em todas as plantas com restrição hídrica em comparação às irrigadas. No entanto, o NVP foi maior 51,6% nas plantas com tratamento E em relação às plantas controle na mesma condição de déficit hídrico. O peso de 100 sementes foi maior nas plantas do feijão-caupi dos tratamentos E e E+AF expostas ao déficit hídrico que foi de 7,6% e 8,2%, respectivamente, em comparação às plantas irrigadas (Tabela 2).

Tabela 2 Comprimento de vagem (CV), peso médio de vagem (PV), peso de sementes por vagem (PSV), número de vagens por planta (NVP), número de sementes por planta (NSP), e peso de 100 sementes (P100) de plantas de feijão cultivadas sob duas condições de disponibilidade hídrica (irrigadas e déficit hídrico) e quatro métodos de aplicação de brassinosteróide (controle – sem BR (C), Embebição das sementes (E), Aplicação foliar (AF) e Embebição das sementes + Aplicação foliar (E+AF)).

Tratamentos		CV (cm)	PV (g)	PSV (g)	NVP (unid.)	NSP (unid.)	P100 (g)
Irrigado	Controle	20,61 ± 0,221 Aa	3,47 ± 0,070 Aa	2,61 ± 0,135 ns	12,75 ± 0,875 Aa	151,12 ± 7,952 Aa	20,89 ± 0,944 Aa
	E	19,75 ± 0,212 Aa	3,04 ± 0,062 Aa	2,30 ± 0,019	15,25 ± 1,606 Aa	165,81 ± 6,823 Aa	21,59 ± 0,233 Ba
	AF	20,05 ± 0,210 Aa	3,11 ± 0,080 Aa	2,55 ± 0,053	15,00 ± 0,984 Aa	168,87 ± 3,650 Aa	21,76 ± 0,492 Aa
	E+AF	20,57 ± 0,249 Aa	3,11 ± 0,095 Aa	2,44 ± 0,064	15,37 ± 1,151 Aa	169,00 ± 10,041 Aa	21,62 ± 0,277 Ba
Déficit Hídrico	Controle	19,37 ± 0,025 Ba	2,83 ± 0,042 Ba	2,26 ± 0,037 ns	7,50 ± 0,250 Bb	69,00 ± 2,187 Ba	20,99 ± 0,238 Ab
	E	19,46 ± 0,522 Aa	3,08 ± 0,143 Aa	2,45 ± 0,143	11,37 ± 0,622 Ba	99,50 ± 8,855 Ba	23,23 ± 0,113 Aa
	AF	19,85 ± 0,310 Aa	2,86 ± 0,134 Aa	2,38 ± 0,134	10,50 ± 0,395 Bab	84,87 ± 6,999 Ba	22,90 ± 0,205 Aa
	E+AF	20,05 ± 0,312 Aa	3,02 ± 0,148 Aa	2,33 ± 0,148	9,87 ± 0,512 Bab	80,62 ± 1,451 Ba	23,40 ± 0,334 Aa

ns = não significativo. As letras maiúsculas iguais não diferem entre as condições hídricas para o mesmo método de aplicação de brassinosteróide. As letras minúsculas iguais não diferem entre os métodos de aplicação de brassinosteróide em cada condição hídrica (P <0,05; Teste de Tukey).

As associações entre as características fisiológicas e de produção avaliadas em plantas de feijão-caupi foram estimadas com base na análise de componentes principais (PCA). Os dois primeiros componentes principais explicaram 80,4% da variância, 63,8% atribuídos ao Dim1 e 16,6% ao Dim2, evidenciando separação entre os tratamentos irrigados (IRRIG) e sob déficit hídrico (ESTRES) (Fig. 6). Observa-se que os tratamentos com aplicação de 24-epibrassinolídeo sob déficit hídrico se distribuíram de forma diferente do controle na mesma condição hídrica. A prolina e os carotenoides, aos 3 DAE, e o peso de 100 grãos estiveram relacionados ao tratamento E em plantas em condições de déficit hídrico. O F_v/F_m e CRA aos 3 e 10 DAE estiveram associados aos tratamentos da condição hídrica irrigada, bem como número de vagens por planta (NVP).

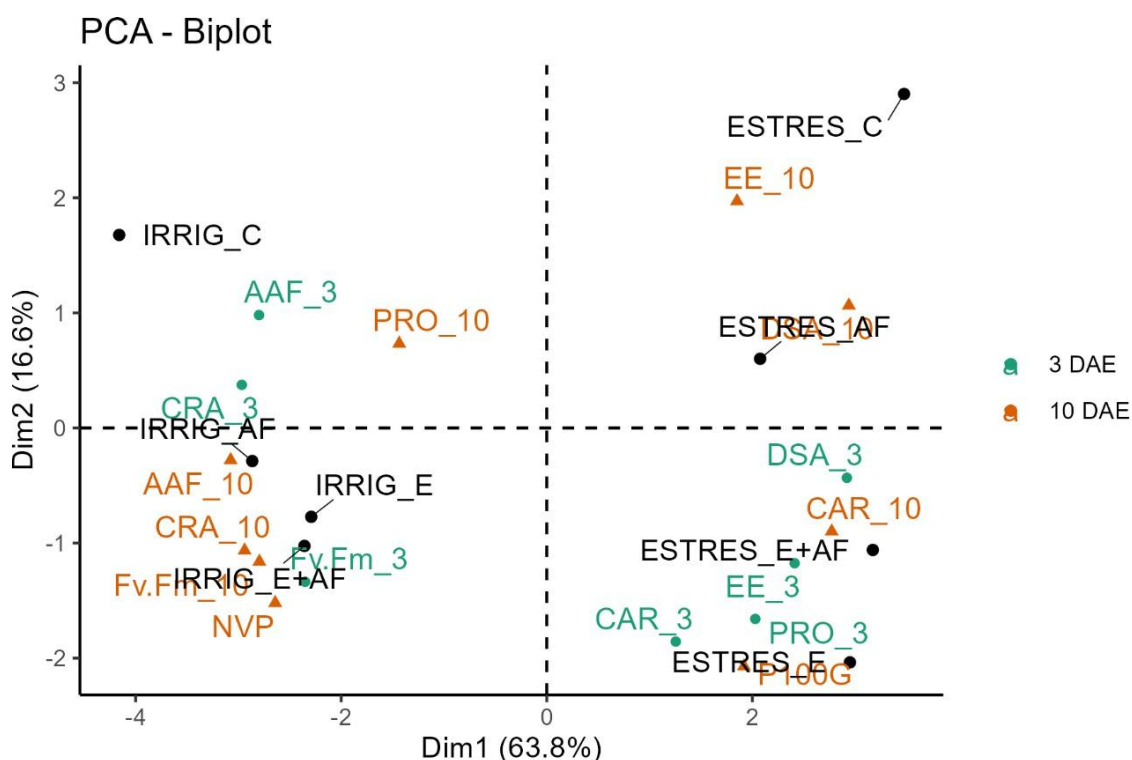


Fig. 6 Análise de componentes principais para características fisiológicas e de produção do feijão-caupi cultivado sob condições irrigadas (IRRIG) ou de déficit hídrico (ESTRES) e tratadas com diferentes métodos de aplicação de brassinosteroides (0,1 μ M). 3 e 10 DAE correspondem às avaliações aos três e 10 dias após o estresse por déficit hídrico. Os tratamentos são: IRRIG C controle; IRRIG E embebição; IRRIG AF aplicação foliar; IRRIG E+AF embebição + aplicação foliar; ESTRES C controle; ESTRES E embebição; ESTRES AF aplicação foliar; ESTRES E+AF embebição + aplicação foliar. As variáveis são: conteúdo relativo de água CRA; déficit de saturação de água DSA; carotenoides CAR; extravasamento de eletrólitos EE; eficiência máxima quântica do fotossistema II F_v/F_m ; número de vagens por planta NVP; peso de 100 grãos P100G.

DISCUSSÃO

O déficit hídrico impactou negativamente as relações hídricas, os pigmentos fotossintéticos, a eficiência fotoquímica máxima do fotossistema II e os componentes de produção em plantas de feijão-caupi.

A redução do conteúdo relativo de água (CRA) e do armazenamento de água na folha (AAF), assim como o aumento do déficit de saturação (DAS) nas plantas de feijão-caupi expostas ao déficit hídrico sugerem que restrições hídricas mais severas e de longa duração podem comprometer o desenvolvimento da cultura. Resultados semelhantes foram observados em plantas de soja em que a intensidade e a duração da restrição hídrica reduziram o CRA (Zhou et al., 2022). Em plantas de feijão da espécie *Phaseolus vulgaris* L. em condição de déficit hídrico, o 24-epibrassinolídeo aumentou o CRA (Mohammadi et al. 2020), assim como em outras espécies de leguminosas, como a soja, em que esse biorregulador mitigou a redução do conteúdo relativo de água das folhas (Maia Júnior et al., 2025), além de manter maior eficiência no uso da água (Perez-Borroto et al. 2022). A manutenção do CRA em plantas sob déficit hídrico é correlacionada ao aumento do conteúdo de prolina (Khamsuk et al. 2018), como observado no presente estudo, especialmente no tratamento de embebição das sementes com EBR.

O aumento no conteúdo de prolina sugere que o EBR, sobretudo pela embebição das sementes, atua no ajuste osmótico das plantas de feijão-caupi, indicando que o biorregulador estimulou mecanismos de osmorregulação, uma estratégia amplamente relatada em plantas submetidas à seca (Mohammadi et al. 2019; Perez-Borroto et al. 2022; Maia Júnior et al. 2025). Fato observado em plantas de videira e de pimenta submetidas ao déficit hídrico que acumularam prolina com aplicação via foliar de EBR, contribuindo para o ajuste osmótico (Khamsuk et al. 2018; Zeng et al. 2024). Em plantas de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) submetidas também à restrição hídrica, o EBR influenciou a expressão de genes que controlam a biossíntese de prolina, o que contribuiu também para o ajuste osmótico (Zhou et al., 2024). O EBR também aumentou o conteúdo de prolina em plantas de tabaco (*Nicotiana tabacum* L.) em condições de déficit hídrico, correlacionado com a maior expressão do gene *P5CS1* que está envolvido com a biossíntese de prolina (Khan et al. 2022).

Por outro lado, o EBR reduz a perda de eletrólitos, indicando que esse biorregulador diminui o acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs), protegendo as membranas celulares em condições de déficit hídrico (Zeng et al., 2024). A aplicação de EBR em plantas de trigo sob estresse hídrico, induzido por polietilenoglicol (PEG 6000), manteve a integridade das

membranas, reduzindo o extravasamento de eletrólitos causado pelo estresse hídrico (Avalbaev et al. 2024). O EBR minimiza o estresse oxidativo e, conseqüentemente, reduz o extravasamento de eletrólitos (Khan et al. 2021).

Os teores de pigmentos fotossintéticos também foram afetados pelo déficit hídrico, embora os tratamentos com EBR tenham apresentado menor redução nos conteúdos de clorofilas *a*, *b* e total. A manutenção dos pigmentos fotossintéticos é um indicativo de menor degradação do aparato fotossintético, e o EBR pode aumentar o teor de clorofilas em plantas estressadas por falta de água, aspecto observado em plantas de videira e de mamão sob déficit hídrico (Sousa et al. 2026; Wang et al. 2015). Em plantas de feijão-caupi o estresse causado por restrição hídrica também resultou em menor conteúdo de clorofila *a*, *b*, total e carotenoides (Gholami et al. 2023). No entanto, em nosso estudo, os carotenoides aumentaram nas plantas do tratamento E expostas ao déficit hídrico em comparação às irrigadas, aos 3 DAE, o que pode indicar atividade acessória de fotoproteção dos carotenoides. Estes pigmentos funcionam como fotoprotetores que dissipam o excesso de energia absorvido pela clorofila, conforme observado em plantas de café em que o déficit hídrico aumentou o conteúdo de carotenoides, protegendo o aparato fotossintético no genótipo mais tolerante (Rodrigues et al. 2023).

A análise da eficiência fotoquímica do PSII (F_v/F_m) foi menor em plantas sob déficit hídrico. Entretanto, o EBR, independente do método aplicado, mitigou essa redução, o que sugere proteção do aparato fotossintético, resultados também observados em feijão-comum e feijão-caupi (Lima e Lobato, 2017; Mohammadi et al. 2019), e em plantas de soja em condições de déficit hídrico em que o EBR contribuiu com o aumento da eficiência fotoquímica máxima do fotossistema II (Silva et al. 2023). Conforme o estudo de Mohammadi et al. (2019) com feijão-comum, a aplicação de EBR aumenta a atividade fotoquímica das plantas o que levou ao aumento na produção de sementes.

O aumento de prolina e de carotenoides no início do déficit hídrico (3 DAE) pode indicar melhor ajuste osmótico e fotoproteção das plantas dos tratamentos de embebição de sementes que contribuiu para os resultados dos componentes de produção, como visualizado na análise de componentes principais. Constatou-se que o tratamento E aumentou o número de vagens por planta (NVP) em comparação às plantas controle na mesma condição de déficit hídrico, e o peso de 100 sementes que aumentou nas plantas dos tratamentos E e E+AF em relação às irrigadas. Resultados semelhantes foram relatados com a embebição de sementes com brassinosteoide em que houve aumento nos componentes de produção de plantas de amendoim sob condições de déficit hídrico por meio da regulação da expressão gênica na transdução de sinal hormonal e na

fotossíntese (Huang et al. 2020). Todavia, em um estudo com leguminosas (feijão-comum; amendoim; soja) sob condição hídrica ideal, a aplicação foliar de BR apresentou os melhores resultados em relação à embebição (Mota et al. 2024), o que pode estar relacionado à condição de ausência de déficit hídrico, e assim a ação do BRs atuar de maneira diferente.

De modo geral, os resultados apresentados evidenciam que o 24-epibrassinolídeo mitiga os efeitos negativos do déficit hídrico sobre os parâmetros fisiológicos e produtivos da cultura feijão-caupi.

CONCLUSÃO

A resposta do feijão caupi ao déficit hídrico e à aplicação de EBR variou de acordo com a severidade do estresse e os métodos de aplicação do biorregulador, sendo as maiores variações entre métodos no início do período de déficit hídrico (3 DAE). Contudo, as alterações promovidas pelo tratamento de E no período inicial do estresse foi determinante para contribuir com o NVP das plantas expostas ao déficit hídrico, melhorando assim os aspectos de produção. Esses resultados trazem novas informações sobre o papel de métodos de EBR na mitigação do déficit hídrico em plantas de feijão-caupi e podem servir como base para novos estudos em outras culturas de interesse agrícola, bem como do feijão em condições de campo.

REFERÊNCIAS

- Abebe BK, Alemayehu MT (2022) A review of the nutritional use of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) for human and animal diets. *J. Agric. Food Res.* 10
- Atteya AKG, El-Serafy RS, El-Zabalawy KM, et al (2022) Brassinolide Maximized the Fruit and Oil Yield, Induced the Secondary Metabolites, and Stimulated Linoleic Acid Synthesis of *Opuntia ficus-indica* Oil. *Horticulturae* 8:. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8050452>
- Avalbaev A, Fedyaev V, Lubyanova A, et al (2024) 24-Epibrassinolide Reduces Drought-Induced Oxidative Stress by Modulating the Antioxidant System and Respiration in Wheat Seedlings. *Plants* 13:. <https://doi.org/10.3390/plants13020148>
- Barros JMTM, Ferreira VM, dos Santos CM, et al (2023) 24-Epibrassinolide in the Flowering Stage Mitigates the Effects of Temporary Drought Stress and Favors the Post-stress Recovery in Soybean. *J Plant Growth Regul* 42:7038–7053. <https://doi.org/10.1007/s00344-023-10995-0>
- Barros JRA, Guimarães MJM, Simões WL, et al (2021) Water restriction in different phenological stages and increased temperature affect cowpea production. *Ciencia e Agrotecnologia* 45:1–12. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202145022120>

- Barros JRA, Guimarães MJM, Simões WL, et al (2021) Water restriction in different phenological stages and increased temperature affect cowpea production. *Ciencia e Agrotecnologia* 45:1–12. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202145022120>
- Campos FL, Ribeiro VQ, Rocha M (2000) Ciclo fenológico em caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp.): uma proposta de escala de desenvolvimento Universidade Federal do Delta do Parnaíba
- Castañeda-Murillo CC, Rojas-Ortiz JG, Sánchez-Reinoso AD, et al (2022) Foliar brassinosteroid analogue (DI-31) sprays increase drought tolerance by improving plant growth and photosynthetic efficiency in lulo plants. *Heliyon* 8:. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08977>
- Ferreira DP, Sousa DP, Nunes HGGC, et al (2021) Cowpea ecophysiological responses to accumulated water deficiency during the reproductive phase in Northeastern Pará, Brazil. *Horticulturae* 7:. <https://doi.org/10.3390/HORTICULTURAE7050116>
- Freire Filho FR, De Moura Rocha M, Sérgio Torres Briosso P, Ribeiro VQ (2006) Crop Breeding and Applied Biotechnology Brazilian Society of Plant Breeding. Printed in Brazil “BRS Guariba”: white-grain cowpea cultivar for the mid-north region of Brazil
- Freitas RMO de, Dombroski JLD, De Freitas FCL, et al (2017) Physiological responses of cowpea under water stress and rewatering in no-tillage and conventional tillage systems. *Revista Caatinga* 30:559–567. <https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n303rc>
- Furio RN, Salazar SM, Mariotti-Martínez JA, et al (2022) Brassinosteroid Applications Enhance the Tolerance to Abiotic Stresses, Production and Quality of Strawberry Fruits. *Horticulturae* 8:. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8070572>
- Gholami F, Amerian MR, Asghari HR, Ebrahimi A (2023) Assessing the effects of 24-epibrassinolide and yeast extract at various levels on cowpea’s morphophysiological and biochemical responses under water deficit stress. *BMC Plant Biol* 23:. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04548-6>
- Guimarães JB, Nunes C, Pereira G, et al (2023) Genetic Diversity and Population Structure of Cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) Landraces from Portugal and Mozambique. *Plants* 12:. <https://doi.org/10.3390/plants12040846>
- Huang L, Zhang L, Zeng R, et al (2020a) Brassinosteroid priming improves peanut drought tolerance via eliminating inhibition on genes in photosynthesis and hormone signaling. *Genes (Basel)* 11:1–23. <https://doi.org/10.3390/genes11080919>
- Khamsuk O, Sonjaroon W, Suwanwong S, et al (2018) Effects of 24-epibrassinolide and the synthetic brassinosteroid mimic on chili pepper under drought. *Acta Physiol Plant* 40:. <https://doi.org/10.1007/s11738-018-2682-z>
- Khamsuk O, Sonjaroon W, Suwanwong S, et al (2018) Effects of 24-epibrassinolide and the synthetic brassinosteroid mimic on chili pepper under drought. *Acta Physiol Plant* 40:. <https://doi.org/10.1007/s11738-018-2682-z>
- Khan I, Awan SA, Ikram R, et al (2021) Effects of 24-epibrassinolide on plant growth, antioxidants defense system, and endogenous hormones in two wheat varieties under drought stress. *Physiol Plant* 172:696–706. <https://doi.org/10.1111/ppl.13237>
- Khan I, Awan SA, Ikram R, et al (2021) Effects of 24-epibrassinolide on plant growth, antioxidants defense system, and endogenous hormones in two wheat varieties under drought stress. *Physiol Plant* 172:696–706. <https://doi.org/10.1111/ppl.13237>

- Lima J V., Lobato AKS (2017) Brassinosteroids improve photosystem II efficiency, gas exchange, antioxidant enzymes and growth of cowpea plants exposed to water deficit. *Physiology and Molecular Biology of Plants* 23:59–72. <https://doi.org/10.1007/s12298-016-0410-y>
- Liu C, Feng B, Zhou Y, et al (2022) Exogenous brassinosteroids increases tolerance to shading by altering stress responses in mung bean (*Vigna radiata* L.). *Photosynth Res* 151:279–294. <https://doi.org/10.1007/s11120-021-00887-3>
- Maia Júnior S de O, de Andrade JR, de Oliveira Sousa VF, et al (2025) Seed Priming with Brassinosteroids Mitigates Pre-Flowering Drought Stress in Soybean Varieties. *J Soil Sci Plant Nutr* 25:3545–3560. <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02351-w>
- Mohammadi M, Pouryousef M, Tavakoli A, Fard EM (2019a) Improvement in photosynthesis, seed yield and protein content of common bean (*Phaseolus vulgaris*) by foliar application of 24-epibrassinolide under drought stress. *Crop Pasture Sci* 70:535–545. <https://doi.org/10.1071/CP18424>
- Mohammadi M, Tavakoli A, Pouryousef M, Mohseni Fard E (2020) Study the effect of 24-epibrassinolide application on the Cu/Zn-SOD expression and tolerance to drought stress in common bean. *Physiology and Molecular Biology of Plants* 26:459–474. <https://doi.org/10.1007/s12298-020-00757-7>
- Mota MM, van Der Watt E, Khetsha ZP (2024) FOLIAR APPLICATION OF BRASSINOSTEROIDS IMPROVES THE YIELD AND MORPHO-PHYSIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF ARACHIS HYPOGAEA L., GLYCINE MAX (L.), AND PHASEOLUS VULGARIS L. *Appl Ecol Environ Res* 22:355–371. https://doi.org/10.15666/aeer/2201_355371
- Osakabe Y, Osakabe K, Shinozaki K, Tran LSP (2014) Response of plants to water stress. *Front. Plant Sci.* 5
- Perez-Borroto LS, Guzzo MC, Posada G, et al (2022) A brassinosteroid functional analogue increases soybean drought resilience. *Sci Rep* 12:. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15284-6>
- Pinheiro FA de S, de Oliveira Maia Júnior S, de Andrade JR, et al (2025) Brassinosteroids alleviate of harmful effects of prolonged water deficit in young *Euterpe oleracea* palms increasing water use efficiency. *Acta Physiol Plant* 47:. <https://doi.org/10.1007/s11738-025-03804-6>
- Rodrigues AP, Pais IP, Leitão AE, et al (2023) Uncovering the wide protective responses in *Coffea* spp. leaves to single and superimposed exposure of warming and severe water deficit. *Front Plant Sci* 14:. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1320552>
- Saha D, Choyal P, Mishra UN, et al (2022) Drought stress responses and inducing tolerance by seed priming approach in plants. *Plant Stress* 4:. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100066>
- Siddiqi KS, Husen A Significance of brassinosteroids and their derivatives in the development and protection of plants under abiotic stress. <https://doi.org/10.1007/s11756-021-00853-3/Published>
- Silva ALJ, Ferreira VM, dos Santos CM, et al (2023) 24-Epibrassinolide promotes activation of physiological compensation mechanisms in response to drought stress and rehydration and improves yield in soybean. *J Agron Crop Sci* 209:355–370. <https://doi.org/10.1111/jac.12628>
- Silva APS da, Alencar AA da S, Sudré CP, et al (2024) Brassinosteroids: Relevant Evidence Related to Mitigation of Abiotic and Biotic Stresses in Plants. *Agronomy* 14
- Silva APS da, Alencar AA da S, Sudré CP, et al (2024) Brassinosteroids: Relevant Evidence Related to Mitigation of Abiotic and Biotic Stresses in Plants. *Agronomy* 14

- Soliman M, Elkelish A, Souad T, et al (2020) Brassinosteroid seed priming with nitrogen supplementation improves salt tolerance in soybean. *Physiology and Molecular Biology of Plants* 26:501–511. <https://doi.org/10.1007/s12298-020-00765-7>
- Sousa DJP, Nogueira GAS, Teixeira KBS, et al (2022) Mitigation of the effects of salt stress in cowpea bean through the exogenous application of brassinosteroid. *Brazilian Journal of Biology* 82:. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.260818>
- Sousa VF de O, Alves da Silva J, Maia JM, et al (2026) Exogenous brassinosteroid mitigates water deficit in papaya plants by enhancing photosynthetic pigment and sugar content. *South African Journal of Botany* 188:282–294. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2025.10.049>
- Wang Z, Zheng P, Meng J, Xi Z (2015) Effect of exogenous 24-epibrassinolide on chlorophyll fluorescence, leaf surface morphology and cellular ultrastructure of grape seedlings (*Vitis vinifera* L.) under water stress. *Acta Physiol Plant* 37:. <https://doi.org/10.1007/s11738-014-1729-z>
- Zanon De Moura J, De Moura Pádua LE, De Moura SG, et al ESCALA DE DESENVOLVIMENTO FENOLÓGICO E EXIGÊNCIA TÉRMICA ASSOCIADA A GRAUS-DIA DO FEIJÃO-CAUPI 1. *Revista Caatinga* 25:66–71
- Zeng G, Wan Z, Xie R, et al (2024) 24-epibrassinolide enhances drought tolerance in grapevine (*Vitis vinifera* L.) by regulating carbon and nitrogen metabolism. *Plant Cell Rep* 43:. <https://doi.org/10.1007/s00299-024-03283-y>
- Zhang H, Zhao D, Tang Z, et al (2022) Exogenous brassinosteroids promotes root growth, enhances stress tolerance, and increases yield in maize. *Plant Signal Behav* 17:. <https://doi.org/10.1080/15592324.2022.2095139>
- Zhou Q, Li Y, Wang X, et al (2022) Effects of Different Drought Degrees on Physiological Characteristics and Endogenous Hormones of Soybean. *Plants* 11:. <https://doi.org/10.3390/plants111172282>
- Zhou YL, You XY, Wang XY, et al (2024) Exogenous 24-Epibrassinolide Enhanced Drought Tolerance and Promoted BRASSINOSTEROID-INSENSITIVE2 Expression of Quinoa. *Plants* 13:. <https://doi.org/10.3390/plants13060873>

grove1979