UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

SILÍCIO E SOMBREAMENTO ATENUAM OS EFEITOS DO DÉFICIT HÍDRICO NO METABOLISMO E NO CRESCIMENTO FOLIAR DE MUDAS DE *Dipteryx alata* Vog.

MÁRCIO SANTOS DA SILVA

DOURADOS

MATO GROSSO DO SUL

2022

SILÍCIO E SOMBREAMENTO ATENUAM OS EFEITOS DO DÉFICIT HÍDRICO NO METABOLISMO E NO CRESCIMENTO FOLIAR DE MUDAS DE *Dipteryx alata* Vog.

MÁRCIO SANTOS DA SILVA
Engenheiro agrônomo

Orientadora: Prof.ª Drª. SILVANA DE PAULA QUINTÃO SCALON

Tese apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal, para obtenção do título de Doutor.

DOURADOS

MATO GROSSO DO SUL

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

S586s Silva, Marcio Santos Da

Silício e Sombreamento Atenuam os Efeitos do Déficit Hídrico no Metabolismo e no Crescimento Foliar de Mudas de Dipteryx alata Vog. [recurso eletrônico] / Marcio Santos Da Silva. -- 2022.

Arquivo em formato pdf.

Orientadora: Silvana de Paula Quintão Scalon.

Tese (Doutorado em Agronomia)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2022.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em: https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio

1. Baru. 2. mitigação. 3. fotossintese. 4. recuperaçao. 5. sombra. I. Scalon, Silvana De Paula Quintão. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

SILÍCIO E SOMBREAMENTO ATENUAM OS EFEITOS DO DÉFICIT HÍDRICO NO METABOLISMO E NO CRESCIMENTO FOLIAR DE MUDAS DE *Dipteryx alata* Vog.

por

MÁRCIO SANTOS DA SILVA

Tese apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de DOUTOR EM AGRONOMIA

Aprovado em: 29/04/2022.

Profa. Dra. Silvana de Paula Quintão Scalon
Orientador – UFGD/FCA

Profa. Dra. Alessandra Mayumi Tokura Alovisi
UFGD/FCA

Prof. Dr. Cleberton Correia Santos UFGD/FCA
UFGD/FCA

Prof. Dr. Edilson Costa
UEMS/Cassilândia

Prof. Dr. Franciscleudo Bezerra da Costa
UFCG/CCTA/Pombal - PB

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder mais essa vitória grandiosa na minha vida.

Aos meus pais, Joelita Cândida dos Santos e João José da Silva e meus irmãos Marcos Vinicius Santos da Silva e Juscicleide dos Santos que sempre me apoiaram e incentivaram a seguir em frente.

A minha orientadora Silvana de Paula Quintão Scalon pela oportunidade, pela confiança, pelas orientações, pela amizade, apoio e por toda compreensão durante esta jornada de crescimento profissional e pessoal.

A Cleberton Correia Santos e Daiane Mugnol Dresch por toda ajuda recebida durante esse período de conhecimentos, orientações, paciência, parcerias, enfim a todos os conselhos e ensinamos que vou carregar comigo pelo resto da minha vida.

A todos os amigos que fiz durante o curso do doutorado, principalmente os que tiveram uma maior convivência comigo, Alexandre Alves, Denise Prevedel, Diandra Della Flora, Felipe Cardoso, Odair Honorato, Wagner da Paz, Valéria Surubi e Viviane Wruck.

Ao Grupo de Estudos em Ecofisiologia de Plantas (FCA - UFGD), em especial as minhas parceiras de trabalho Juliana Milene Silverio e Joice Kellen Ventura, que passaram diversas etapas das suas vidas me ajudando da melhor forma possível.

Ao programa de pós-graduação em Produção Vegetal da Universidade Federal da Grande Dourados-UFGD por toda infraestrutura e apoio para realização desta pesquisa. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela concessão de bolsa de estudos.

A todos os professores, técnicos de laboratório e funcionários que partilharam um pouco do seu conhecimento, tempo e ajuda.

E por fim agradeço ao Campus da UFGD e a todos que dia-a-dia trabalham de forma direta ou indireta contribuindo para realizar não somente o meu sonho, mas também, o sonho de muitas outras pessoas que batalham diariamente em busca da vitória, meu muito obrigado.

SUMÁRIO

Página

LISTA DE FIGURAS..... V
LISTA DE QUADROS..... Vii
RESUMO GERAL..... Viii
ABSTRACT..... X
1 INTRODUÇÃO GERAL..... 12
2. OBJETIVOS..... 17
2.1 Objetivo geral..... 17
2.2 Objetivos específicos..... 17
2.3 Referências..... 18

3. CAPÍTULO I: SILÍCIO ALIVIA O DÉFICIT HÍDRICO E CONTRIBUI NA RECUPERAÇÃO DE MUDAS DE *Dipteryx alata*..... 22

Resumo..... 23
3.1 Introdução..... 24
3.2 Material e Métodos..... 25
3.3 Resultados..... 27
3.4 Discussão..... 33
3.5 Conclusões..... 37
3.6 Referências..... 37

4. CAPÍTULO II. SILÍCIO E SOMBREAMENTO ATENUAM OS EFEITOS DO DÉFICIT HÍDRICO SOBRE O METABOLISMO E O CRESCIMENTO FOLIAR DE MUDAS DE *D. alata*..... 42

Resumo..... 43
4.1 Introdução..... 44
4.2 Material e Métodos..... 46
4.3 Resultados..... 48
4.4 Discussão..... 55
4.5 Conclusões..... 60
4.6 Referências..... 61

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... 65

LISTA DE FIGURAS

Página

CAPÍTULO I. SILÍCIO ALIVIA O DÉFICIT HÍDRICO E CONTRIBUI NA RECUPERAÇÃO DE MUDAS DE *Dipteryx alata*

Figura 1. Dinâmica da fotossíntese (*A*) em mudas de *D. alata* produzidas sob diferentes regimes hídricos (I: Irrigada; II: irrigação intermitente combinada sem e com 0,75 e 1,50 de Si) em diferentes períodos de avaliação (T0: tempo zero; F0: fotossíntese próximo a zero; REC: recuperação: POS-REC: período após a recuperação.....28

Figura 2. Fotossíntese – *A* (a), concentração intracelular de CO_2 – C_i (b), transpiração – *E (*c), condutância estomática – *gs* (d), eficiência intrínseca de carboxilação da Rubisco A/C_i (e) e eficiência do uso da água – *EUA* (f) em mudas de *D. alata* produzidas sob diferentes regimes hídricos (I: Irrigada; II: irrigação intermitente combinada sem e com 0,75 e 1,50 de Si) em diferentes períodos de avaliação (T0: tempo zero; F0: fotossíntese próximo a zero; REC: recuperação: POS-REC: período após a recuperação 29

Figura 3. Eficiência quântica potencial do fotossistema II - F_V/F_M (a e d), eficiência de conversão de energia absorvida - F_V/F_0 (b/e), produção quântica basal dos processos não fotoquímicos - F_0/F_M (b), fluorescência inicial F_0 (e) e fluorescência máxima da clorofila-*a* F_M (f) em mudas de *D. alata* produzidas sob diferentes regimes hídricos (I: Irrigada; II: irrigação intermitente combinada sem e com 0,75 e 1,50 de Si) em diferentes períodos de avaliação (T0: tempo zero; F0: fotossíntese próximo a zero; REC: recuperação: POS-REC: período após a recuperação).....31

Figura 4. Área foliar (a), conteúdo relativo de água das folhas CRA (b) e índice de qualidade de Dickson IQD (c e d) em mudas de *D. alata* produzidas sob diferentes regimes hídricos (I: Irrigada; II: irrigação intermitente combinada sem e com 0,75 e 1,50 de Si) em diferentes períodos de avaliação (T0: tempo zero; F0: fotossíntese próximo a zero; REC: recuperação: POS-REC: período após a recuperação.....32

CAPÍTULO II. SILÍCIO E SOMBREAMENTO ATENUAM OS EFEITOS DO DÉFICIT HÍDRICO SOBRE O METABOLISMO E O CRESCIMENTO FOLIAR DE MUDAS DE *D. alata*

Figura 1. Fotossíntese – *A* (a), concentração intracelular de CO_2 – C_i (b), transpiração – *E (*c), condutância estomática – *gs* (d), eficiência intrínseca de carboxilação da Rubisco A/C_i (e) e eficiência do uso da água – *EUA* (f) em mudas de *D. alata* produzidas sob diferentes regimes hídricos (C: Irrigada; E: suspensão da irrigação combinada sem e com 0,75 de Si) em diferentes períodos de avaliação (F0: fotossíntese próximo a zero; REC: recuperação das plantas).....50

Figura 2. Índice de clorofila SPAD (a) Eficiência quântica potencial do fotossistema II - F_V/F_M (b), eficiência de conversão de energia absorvida - F_V/F_0 (c e d) e produção quântica basal dos processos não fotoquímicos - F_0/F_M (e) em mudas de *D. alata* produzidas sob diferentes regimes hídricos (C: Irrigada; E: suspensão da irrigação combinada sem e com 0,75 de Si) em diferentes períodos de avaliação (F0: fotossíntese próximo a zero; REC: recuperação das plantas).....52

Figura 3. Área foliar (a) e conteúdo relativo de água das folhas CRA (b) em mudas de *D. alata* produzidas sob diferentes regimes hídricos (C: Irrigada; E: suspensão da irrigação combinada sem e com 0,75 de Si) em diferentes períodos de avaliação (F0: fotossíntese próxima à zero; REC: recuperação das plantas).....54

LISTA DE QUADROS

Página

CAPÍTULO II. SILÍCIO E SOMBREAMENTO ATENUAM OS EFEITOS DO DÉFICIT HÍDRICO SOBRE O METABOLISMO E O CRESCIMENTO FOLIAR DE MUDAS DE *D. alata*

Tabela 1. Atividade da fotossíntese (*A*) em mudas de *D. alata* cultivadas em função das condições de irrigação continua (C) e intermitente (II) combinada sem e com 0,75 de Si, sombreamento (0, 30 e 70%) em diferentes períodos de avaliação (T0: tempo zero; F0: fotossíntese próxima à zero; REC: recuperação das plantas).....49

RESUMO GERAL

Um dos grandes desafios a serem superados nos próximos anos, pelas espécies arbóreas nativas no Cerrado, são os estresses de natureza abióticos, principalmente, o déficit hídrico, o que dificultando o crescimento e o desenvolvimento das plantas neste bioma. Assim, faz-se necessário o uso de tecnologias que possam mitigar os danos causados aos vegetais por este estresse. Neste estudo objetivou-se avaliar o comportamento fisiológico e morfoanatômico de mudas de *Dipteryx alata* submetidas ao déficit hídrico, às doses de silício e ao uso de níveis de sombreamento. Para isto o estudo foi dividido em dois experimentos relatados em dois capítulos. No primeiro capítulo foram estudados quatro regimes hídricos: Irrigação contínua – I: Déficit hídrico – II + 0,00 mL de Si, Déficit hídrico + 0,75 mL de Si e Déficit hídrico + 1,50 mL de Si. As mudas foram avaliadas em quatro períodos: (1) (T0 – tempo zero) início do experimento, período antes de iniciar a suspensão da irrigação; (2) (F0) quando os valores da t fotossíntese (*A*) nas mudas sob suspensão da irrigação chegaram próximos à zero, com a retomada da irrigação; (3) (REC) valores de *A* próximos ao das mudas sob irrigação contínua, caracterizando a recuperação e (4) (POS-REC) 45 dias após a REC quando as mudas foram mantidas sob irrigação contínua, semelhante ao controle. A aplicação de 0,75 mL de Si propicia diminuição nos danos ao aparato fotossintético das mudas de *D. alata* por maior período sob déficit hídrico, e contribui na recuperação fisiológica de maneira mais rápida após a retomada da irrigação. Durante o POS-REC todas as mudas recuperaram seu potencial fisiológico e de crescimento. No segundo capítulo, as mudas foram separadas em três grupos e foram transferidas para viveiros sob três níveis de sombreamento: 0 (pleno sol), 30 e 70% de sombreamento. Em cada sombreamento as mudas receberam três regimes hídricos: Irrigação contínua – C, Suspensão da irrigação e Suspensão da irrigação + aplicação de 0,75 mL Si. Para caracterização do metabolismo fotossintético, as mudas foram avaliadas no T0 – tempo zero início do experimento, período antes de iniciar a suspensão da irrigação. Após a suspensão da irrigação, as mudas foram avaliadas em dois períodos: quando os valores da fotossíntese (*A*) nas mudas sob suspensão da irrigação chegaram próximos à zero, período que ocorreu a retomada da irrigação e quando a fotossíntese alcançou valores próximos ao das mudas sob irrigação contínua, recuperação. A interação sombreamento e silício mitigou o efeito estressante do déficit hídrico durante a restrição hídrica em mudas de *D. alata*, uma vez que retardaram a redução da fotossíntese e anteciparam sua recuperação. Durante o déficit hídrico o sombreamento de 70% independente do silício manteve o índice SPAD e as características de fluorescência da clorofila *a* com valores semelhantes ou superiores e com

menor redução do conteúdo relativo de água das folhas. Todas as características avaliadas se recuperaram após a retomada da irrigação, exceto a eficiência de carboxilação da Rubisco (A/Ci), independente dos tratamentos.

Palavras-chave: Baru, mitigação, fotossíntese, recuperação, sombra.

ABSTRACT

One of the great challenges to be overcome in the coming years by native tree species in the Cerrado are the abiotic stresses, mainly water deficit, which hinders the growth and development of plants in this biome. Thus, it is necessary to use technologies that can mitigate the damage caused to plants by this stress. The aim of this study was to evaluate the physiological and morphoanatomical behavior of *Dipteryx alata* seedlings subjected to water deficit, silicon doses and the use of shading levels. For this, the study was divided into two experiments reported in two chapters. In the first chapter, four water regimes were studied: Continuous irrigation – I: Water deficit – II + 0,00 mL of Si, Water deficit + 0,75 mL of Si and Water deficit + 1,50 mL of Si. The seedlings were evaluated in four periods: (1) (T0 – time zero) beginning of the experiment, period before starting the irrigation suspension; (2) (F0) when the values of t photosynthesis (*A*) in seedlings under suspension of irrigation reached zero, with the resumption of irrigation; (3) (REC) A values close to those of the seedlings under continuous irrigation, characterizing the recovery and (4) (POS-REC) 45 days after the REC when the seedlings were kept under continuous irrigation, similar to the control. The application of 0,75 mL of Si provides a decrease in damage to the photosynthetic apparatus of *D. alata* seedlings for a longer period under water deficit, and contributes to a faster physiological recovery after resuming irrigation. During the POS-REC all the seedlings recovered their physiological and growth potential. In the second chapter, the seedlings were separated into three groups and transferred to nurseries under three shade levels: 0 (full sun), 30 and 70% shade. In each shading, the seedlings received three water regimes: Continuous irrigation – C, Suspension of irrigation and Suspension of irrigation + application of 0,75 mL Si. For the characterization of photosynthetic metabolism, the seedlings were evaluated at T0 – time zero at the beginning of the experiment, period before starting the suspension of irrigation. After the suspension of irrigation, the seedlings were evaluated in two periods: when the values of photosynthesis (*A*) in the seedlings under suspension of irrigation reached zero, when irrigation was resumed, and when photosynthesis reached values close to that of the seedlings. Under continuous irrigation, recovery. The interaction between shading and silicon mitigated the stressful effect of water deficit during water restriction in *D. alata* seedlings, since they delayed the

reduction of photosynthesis and anticipated its recovery. During water deficit, 70% shading independent of silicon maintained the SPAD index and chlorophyll a fluorescence characteristics with similar or higher values and with less reduction in the relative water content of the leaves. All the evaluated characteristics recovered after irrigation resumption, except the Rubisco carboxylation efficiency (A/Ci), regardless of the treatments.

Keywords: Baru, mitigation, photosynthesis, recovery, shade.

1. INTRODUÇÃO GERAL

O bioma Cerrado é o segundo maior do país, ocupando cerca de 23% do território nacional, superado em área, apenas, pelo bioma Amazônia (HONORIO et al., 2019) e apresenta vegetação com diversas fitofisionomias a mais rica flora dentre as savanas do mundo (KLINK e MACHADO, 2005). O Cerrado é considerado um dos 34 *hotspots* do mundo para fins de conservação, por conta de seu endemismo, diversidade biológica e ameaça pela ocupação humana (MYERS et al., 2000). Estudos relatam que, aproximadamente, 61% deste bioma, ainda, possuem a vegetação nativa em estado relativamente intacto, que a parte norte apresenta 90% das fisionomias naturais e a parte sul apenas 15% (HONORIO et al., 2019).

Dentre as espécies frutíferas de grande importância na região do Cerrado destaca-se o baru (*Dipteryx alata* Vog.) que é uma leguminosa arbórea pertencente à família Fabaceae (LISTA, 2014). Naturalmente, esta espécie está distribuída nos estados de Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e São Paulo (BASILIO et al., 2018). É uma nativa do Cerrado com intensa frutificação na fase adulta, com florescimento nos fins de outubro a meados de dezembro e frutificação de agosto a outubro (BASILIO et al., 2018). Os frutos contêm amêndoas com alto valor proteico, superior ao do amendoim, possui altos teores de lipídios, ferro e zinco, podem ser consumidos *in natura* ou na forma de farinha e doces, as sementes (amêndoas) são consumidas torradas e o óleo também são extraídos dos frutos (SOUSA et al., 2011; Costa et al., 2015; BASILIO et al., 2018).

O baru (*D. alata*) apresenta altura média de 15 metros, tendo caule ereto e ramos lisos (ISA, 2009). Além dos frutos para alimentação, a planta se apresenta promissora em projetos de recuperação de áreas degradadas, bem como em sistemas agrossilvipastoris e agroflorestais, devido à sua copa densa e arredondada, crescimento rápido e alta produção de biomassa foliar, que contribui para fixar o carbono na atmosfera e proporcionar sombra (SANO et al., 2016). A sua madeira é pesada, muito utilizada na construção civil, sendo muito resistente ao apodrecimento e ao ataque de besouros, cupins e vespas (COSTA et al., 2015). É uma espécie que tem seu estabelecimento preferencialmente em solos bem drenados (LINNÉ et al., 2021) e quanto à sua sucessão ecológica, é classificada como secundária tardia exigindo menos irradiância de luz para o seu desenvolvimento (QUEIROZ e FIRMINO, 2014).

Nas últimas décadas, com as grandes variações climáticas no mundo, o bioma Cerrado vem sofrendo com o baixo nível de chuvas durante o ano, causando redução na disponibilidade hídrica, fazendo com que o desenvolvimento das espécies vegetais na região seja prejudicado. A falta de água no solo limita intensamente o crescimento das espécies vegetais em várias regiões do mundo, tornando-se limitante principalmente nos períodos de baixa pluviosidade, ocasionando efeitos deletérios que poderão afetar o crescimento e desenvolvimento das plantas (MAR et al., 2013).

O déficit hídrico é um dos principais causadores de estresse nos vegetais, sendo um dos responsáveis por gerar distúrbios ao crescimento das plantas, dentre os efeitos ocasionados pela deficiência hídrica na célula vegetal está à desidratação, seguido por redução do potencial hídrico e da resistência hidráulica nos vasos do xilema (NUNES et al., 2019). Esses efeitos resultam em prejuízos na expansão foliar, atividades celulares e metabólicas; fechamento estomático; inibição fotossintética; abscisão foliar, cessando o crescimento da planta (TAIZ et al., 2017). Além disso, sob déficit hídrico, maior parte das espécies tem seus processos fisiológicos alterados, principalmente as trocas gasosas, limitando assim os processos fotossintéticos e a síntese de solutos orgânicos, uma vez que a absorção de carbono é restrita (CHARTZOULAKIS et al., 2002; SCALON et al., 2020).

Ferrari et al. (2015) afirmam que o déficit hídrico favorece a produção de espécies reativas de oxigênio (EROS), nas formas de oxigênio singleto ($^1O_2$), peróxido de hidrogênio (H_2O_2), radical hidroxila (OH^-) e ânion superóxido (O_2^-), que ocorre durante a fotossíntese e fotorrespiração e são tóxicas às células. As (EROS) podem se ligar com moléculas vitais, como gorduras, proteínas, ácidos nucleicos, causando a peroxidação lipídica, desnaturação de proteínas e mutação no DNA e danos no RNA, às proteínas das membranas celulares, oxidando pigmentos fotossintéticos, podendo levar à morte celular (BASTOS, 2017).

Nesse contexto, tem crescido a busca por tecnologias que atuem e mitiguem os efeitos deletérios ocasionados pelo déficit hídrico às plantas. Assim, pesquisas com o Silício (Si) têm surgidas e mostradas resultados que este elemento atua como um dos principais agentes de mitigação dos estresses abióticos em diversas espécies de plantas, em especial, na manutenção da qualidade das mudas de espécies nativas na região do Cerrado sob o estresse hídrico.

O Si é encontrado no solo na forma de silicato ou silicatos de alumínio, sendo o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre, ficando somente atrás do oxigênio (ETESAMI e JEONG, 2018). É absorvido pela planta na forma de ácido monossilícico

(H_4SiO_4) juntamente com a água, acumulando-se principalmente nos tricomas e espinhos (NUNES et al., 2019).

Apesar de não ser considerado um nutriente essencial para as plantas, o Si é classificado por muitos autores como um elemento benéfico, tendo uma função importante no metabolismo fotossintético, melhorando a sobrevivência de plantas superiores expostas a diferentes estresses abióticos e bióticos (LIANG et al., 2015). Dentre os efeitos benéficos desse elemento químico, está à manutenção da fotossíntese, aumento da resistência mecânica das células, maior resistência das plantas às doenças e pragas; diminuição do efeito tóxico de Mn, Fe e outros metais pesados; aumento da absorção e metabolismo de elementos (GONG et al., 2005; NUNES et al., 2019). O Si participa de processos fisiológicos das plantas, tais como manutenção do conteúdo de água (LIU et al., 2014), estabilização dos processos fotoquímicos no fotossistema II – FS II (SILVA et al., 2017), assim como aumenta a rigidez estrutural no tecido da planta (LIMA et al., 2019) e contribui com a síntese de fitormônios (MARKOVICH et al., 2017).

O Si também atua modulando os sistemas de defesa antioxidante das plantas, fazendo com que ocorra um aumento na atividade das principais enzimas antioxidantes como a superóxido dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT), ascorbato peroxidase (APX) e glutationa redutase (GR) (KIM et al., 2017). Além disso, ele atua também sobre a atividade de antioxidantes não enzimáticos, como glutationa reduzida (GSH) e ascorbato (AsA), que por sua vez diminuem o nível de peroxidação lipídica, atividade da lipoxigenase (LOX) e acúmulo de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) (GUNES et al., 2007; HASANUZZAMAN et al., 2018), aliviando o estresse oxidativo causado pelas (EROS) em plantas sob estresse hídrico (KIM et al., 2017).

Recentemente, na literatura, são relatados trabalhos com resultados positivos no uso do Silício como agente mitigador do estresse hídrico em algumas espécies de plantas. Ma et al. (2016) mostraram em seus estudos que a suplementação de Si pode diminuir a peroxidação lipídica, glutationa e flavonoides, mas aumentar o teor de AsA em plantas de trigo sob condição de seca. Em arroz, Mauad et al. (2016), observaram melhora dos parâmetros bioquímicos sob estresse hídrico, o que tornou a cultura bem adaptável à seca. Yi et al. (2018), também encontraram aumento significativo na biomassa de tomate em mudas tratadas com silício sob estresse hídrico.

Fatima et al. (2019) afirmam que as aplicações de silício propiciaram melhoria dos processos fisiológicos das plantas de alface sob estresse hídrico, mostrando influências marcantes na fitomassa fresca e no acúmulo de água na parte aérea. Zanão Júnior et al. (2013), também concluíram que a aplicação de silício promove o aumento do número de folhas após conduzirem um experimento com roseiras. Rodrigues et al. (2016), avaliando o comportamento das clorofilas a e b de tomateiro tratado com silicato de potássio via foliar, aplicado semanalmente verificaram aumento nos teores de clorofila a, incrementando a produtividade e o número total de frutos. Silva et al. (2013), ao avaliar a influência do silício na produção e qualidade dos frutos de morangueiro, concluíram que houve aumento na produção quando adubados com o nutriente, independente a forma de aplicação, se via solo ou foliar, interferindo também na acidez total dos frutos e na concentração de antocianina em frutos e folhas.

Dependendo dos fatores ambientais, as plantas necessitam de maiores cuidados, e como mencionados anteriormente o déficit hídrico é um dos estresses ambientais que causam danos ao crescimento e estabelecimento das plantas e quando estão associados com a elevada disponibilidade de luz, pode gerar danos irreversíveis na fisiologia, anatomia e atividade bioquímica das mudas.

Desse modo, como o Silício (Si), o sombreamento faz parte das tecnologias que estão sendo implantadas para a mitigação do déficit hídrico em plantas, principalmente na fase de produção de mudas. Portanto, as plantas sombreadas apresentam como principais respostas ao estresse, aumento da área foliar específica, altura de planta e concentração de clorofilas por unidade de massa (LINNÉ et al., 2021). O aumento de clorofilas nas folhas das plantas cultivadas sob sombra é uma resposta a baixa incidência de luminosidade (MOTA et al., 2012), ou seja, compensação do balanço energético (SILVERIO et al., 2020). Gonçalves et al. (2012) e Gaburro et al. (2015) afirmam que sob sombreamento há menor temperatura foliar e menor taxa transpiratória, possibilitando a alocação de carbono para expandir a superfície foliar.

O maior número de folhas nas plantas sombreadas pode ser considerado um mecanismo de alteração morfofisiológica (SILVERIO et al., 2020) e adaptação para aumentar a captação de luz, maximizando a eficiência fotossintética da planta, uma vez que há um incremento por unidade de superfície fotossintetizante, garantindo maior aproveitamento da luz (GOBBI et al., 2011).

De acordo com Martins et al. (2015), com o aumento do sombreamento, a fotossíntese diminui e, consequentemente, a quantidade de fotoassimilados é reduzida, propiciando aumento gradativo do diâmetro do coleto ao longo do ciclo de cultivo, sendo todas estas respostas adaptáveis à condição de sombreamento (LINNÉ et al., 2021).

Na literatura é possível verificar vários resultados positivos para a produção de mudas em ambientes sombreados, em diversas espécies de plantas. Felsemburgh et al. (2016) mostraram que *Aniba parviflora* (Meisn), sob ambiente sombreado, apresentaram maior diâmetro do caule. Contudo, o mesmo autor reforça que sob baixa disponibilidade de luz, a planta tende a investir mais fotoassimilados na parte aérea (FELSEMBURGH et al., 2016), no entanto, esse crescimento pode ser considerado estiolamento induzido por baixa intensidade de luz.

Outros resultados positivos foram observados por Silverio et al. (2021), em mudas de *Campomanesia xanthocarpa* O. Berg., afirmando que o sombreamento promoveu maiores rendimentos fotoquímicos, indicando estabilidade das atividades no PS II.

Queiroz e Firmino (2014) sugeriram que o sombreamento de 30% é o ideal para *Dipteryx alata* Vog. promovendo maior qualidade das mudas e potenciais de sobrevivência dessas plantas quando comparados a 0 e 50% de sombreamento.

Diante do contexto apresentado, hipotetizamos em nosso estudo que o déficit hídrico, ocasiona efeitos prejudiciais ao crescimento, fisiologia e atividade bioquímica das plantas, contudo a aplicação de Silício associado ao sombreamento contribui para amenizar os danos causados pelo referido estresse e auxilia na recuperação do metabolismo e crescimento de mudas de *Dipteryx alata* Vog.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o comportamento de mudas de *Dipteryx alata* submetidas ao déficit hídrico e o efeito de doses de silício associado a níveis de sombreamento nos aspectos fisiológicos e morfoanatômicos.

2.2 Objetivos específicos

Avaliar o efeito das doses de 0,75 mL e 1,50 mL de Si associado ao déficit hídrico em mudas de baru e seu potencial de recuperação

Avaliar o comportamento morfofisiológico de mudas de baru em diversos regimes hídricos;

Testar os níveis de sombreamento de 0, 30 e 70% em diferentes regimes hídricos com e sem aplicação de Si na formação de mudas de baru.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BASÍLIO, A. C. A.; BARBOSA, G. D.; COELHO, G. M.; ARAÚJO, M. S.; ZUCCHI, M. R. Emergência e Desenvolvimento de Plântulas de *Dipteryx alata* Vogel em Diferentes Substratos. **Revista Agrotecnologia**, v. 9, n. 2, p. 57-65, 2018.

CHARTZOULAKIS, K.; PATAKAS, A.; KOFIDIS, G.; BOSABALIDIS, A.; NASTOU, A. Water stress affects leaf anatomy, gas exchange, water relations and growth of two avocado cultivars. **Scientia Horticulture**, v. 95, n. 1-2, p. 39-50, 2002.

COSTA, E.; DIAS, J. G.; LOPES, K. G.; BINOTTI, F. F. S.; CARDOSO, E. D. Telas de Sombreamento e Substratos na Produção de Mudas de *Dipteryx alata* Vog. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 3, p. 416-425, 2015.

ETESAMI, H.; JEONG, B. R. Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. **Ecotoxicology Environmental Safety**, v 147, n. 1, p. 881-896, 2018.

FATIMA, R. T.; JESUS, E. G.; GUERRERO, A. C.; ROCHA, J. L. A.; BRITO, M. E. B. Silicon fertilization as atenuant of water stress in *lettuce* growth and gas exchanges. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 27, n. 2, p. 170-179, 2019.

FELSEMBURGH, C. A.; SANTOS, K. J. S.; CAMARGO, P. B.; CARMO, J. B.; TRIBUZY, E. S. Respostas ecofisiológicas de *Aniba parviflora* ao sombreamento artificial. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 87, p. 201-210, 2016.

FERRARI, E.; PAZ, A.; SILVA, A. C. Déficit hídrico no metabolismo da soja em semeaduras antecipadas no Mato Grosso. **Nativa**, v. 3, n. 1, p.67-77, 2015.

GABURRO, T. A.; ZANETTI, L. V.; GAMA, V. N.; MILANEZ.; C. R. D.; CUZZUOL, G. R. F. Physiological variables related to photosynthesis are more plastic than the morphological and biochemistry in non-pioneer tropical trees under contrasting irradiance. **Brazilian Journal of Botany**, v. 38, n. 1, p. 39–49, 2015.

GOBBI, K. F.; GARCIA, R.; VENTRELLA, M. C.; NETO, A. F. G.; ROCHA, G. C. Área foliar específica e anatomia foliar quantitativa do capim-braquiária e do amendoim-forrageiro submetidos a sombreamento. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, n. 7, p. 1436-1444, 2011.

GONÇALVES, J. F. D. C.; MELO, E. G. D. F.; SILVA, C. E. M. D.; FERREIRA, M. J.; JUSTINO, G. C. Strategies in the use of light energy by *Genipa spruceana* Steyerm seedlings subjected to fooding. **Acta Botânica Brasílica**, v. 26, n. 2, p. 391–398. 2012.

GONG, H. J.; ZHU, X. Y.; CHEN, K. M.; WANG, S. M.; ZHANG, C. L. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. **Plant Science**, v. 169, n. 2, p. 313–321, 2005.

GUNES, A.; PILBEAM, D. J.; INAL, A.; BAGCI, E. G.; COBAN, S. Influence of silicon on antioxidant mechanisms and lipid peroxidation in chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars under drought stress. **Journal of Plant Interactions**, v. 2, n. 2, p. 105–113. 2007.

HASANUZZAMAN, M.; NAHAR, K.; ANEE, T. I.; KHAN, M. I. R.; FUJITA, M. Silicon-mediated regulation of antioxidant defense and glyoxalase systems confers drought stress tolerance in *Brassica napus*. **South African Journal of Botany**, v. 115, p.50–57, 2018.

HONÓRIO, A. B. M.; LOPES.; M. B. S.; SIEBENEICHLER, S. C.; SOUZA, C. M.; LEAL, T. C. A. B. Growth analysis and physiological parameters in *Dipteryx alata* Vogel seedlings. **Pesquisa Aplicada e Agrotecnologia**, v. 12, n. 1, p. 41-52, 2019.

ISA. Instituto Socioambiental. Mangaba. In: CAMPOS FILHO, E. M. **Plante as árvores do Xingu e Araguaia: guia de identificação**, vol. 2. São Paulo: Instituto Socioambiental. 2009, 304p.

KIM, Y. H.; KHAN, A. L.; WAQAS, M.; LEE, I. J. Silicon Regulates Antioxidant Activities of Crop Plants under Abiotic-Induced Oxidative Stress: A Review. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, n. 510, p. 1-7, 2017.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. A conservação do Cerrado brasileiro. **Megadiversidade**, v. 1, n. 1, p. 148-155, 2005.

LIMA, D. T.; SAMPAIO, M. V.; ALBUQUERQUE, C. J. B.; PEREIRA, H. S.; MARTINS, W. G. Silicon accumulation and its Effect on agricultural traits and anthracnose incidence lignocellulosic *Sorghum*. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 49, p. 1-8, 2019.

LINNÉ, J. A.; JESUS, M. V.; LIMA, V. T.; REIS, L. C.; DRESCH, D. M.; SCALON, S. P. Q.; SANTOS, C. C. Efects of shading on growth and photosynthetic metabolism in *Dipteryx alata* Vogel seedlings under fooding. **Brazilian Journal of Botany**, v. 44, n. 3, p. 629–638, 2021.

LISTA DE ESPÉCIES DA FLORA DO BRASIL. Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <https://dados.gov.br/dataset/portaria-443>. Acesso em: 30 de Mar. 2022.

LIU, P.; YIN, L.; DENG.; X, WANG.; TANAKA, K.; ZHANG, S. Aquaporin-mediated increase in root hydraulic conductance is involved in silicon-induced improved root water uptake under osmotic stress in *Sorghum bicolor* L. **Journal of Experimental Botany**, v. 65, n. 1, p. 4747-4756, 2014.

LOPES, J. S.; COSTA, K. C. P.; FERNANDES, V. S.; GONÇALVES, J. F. C. Functional traits associated to photosynthetic plasticity of young Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) plants. **Flora**, v. 258, p. 151446, 2019.

MA, D.; SUN, D.; WANG, C.; QIN, H.; DING, H.; LI, Y.; GUO, T. Silicon application alleviates drought stress in wheat through transcriptional regulation of multiple antioxidant defense pathways. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 35, n. 1, p. 1–10, 2016.

MAR, C. C.; CONCEIÇÃO, H. E. O.; SANTOS, A. B. R.; VIÉGAS, I. J. M.; SILVA, F. S. N. PRODUÇÃO DE MASSA SECA E ÁREA FOLIAR DO AÇAIZEIRO SOB DÉFICIT HÍDRICO. **Revista Agroecossistemas**, v. 5, n. 2, p. 14-23, 2013.

MARKOVICH, O.; STEINER, E.; KOURIL, S.; TARKOWSKI, P.; AHARONI, A.; ELBAUM, R. Silicon promotes cytokinin biosynthesis and delays senescence in *Arabidopsis* and *Sorghum*. **Plant, Cell e Enviroment**, v. 40, n. 7, p. 1189-1196, 2017.

MARTINS, M. Q.; MARÇAL, T. S.; SOUZA, M. F.; COELHO, R. I. Influência do sombreamento no crescimento de mudas de laranjeira 'Folha Murcha'. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 38, n.3, p. 407-413, 2015.

MAUAD, M.; CRUSCIOL, C. A. C.; NASCENTE, A. S.; GRASSI FILHO, H.; LIMA, G. P. P. Effects of silicon and drought stress on biochemical characteristics of leaves of upland rice cultivars. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 3, p. 532–539. 2016.

MOTA, L. H. S.; SCALON, S. P. Q.; HEIZ, R. Sombreamento na emergência de plântulas e no crescimento inicial de *Dipteryx alata* Vog. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 3, p. 423-431, 2012.

MYERS, N. R. A.; MITTERMEIER, C. G.; MITTERMEIER, G. A. B.; FONSECA, G. A. B.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n. 1, p. 853-858, 2000.

QUEIROZ, S. E. E.; FIRMINO, T. O. Efeito do sombreamento na germinação e desenvolvimento de mudas de baru (*Dipteryx alata* Vog.). **Revista Biociências**, v. 20, n. 1, p. 72-77, 2014.

RODRIGUES, C. R.; RODRIGUES, T. M.; LUZ, J. M. Q.; SOUSA, V. B. F.; SOUSA, J. B.; NUNES, A. C. P.; TRINDADE, P. R. Clorofila a e b de tomateiro tratado com silicato de potássio e fungicida. **Global Science and Technology**, v. 09, n. 2, p. 54-64, 2016.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA, L. G. Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. **Environ Monit Assessment**, v. 166, n. 1, p.113–124, 2010.

SANO, S. M.; BRITO, M. A.; RIBEIRO, J. F. *Dipteryx alata*: Baru. In: VIEIRA R. F.; CAMILLO, J.; CORADIN, L. (eds) **Espécies nativas da fora brasileira de valor econômico atual ou potencial: plantas para o futuro**: **Região Centro-Oeste**. Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, Brasília, pp. 203–215, 2016.

SCALON, S. P. Q.; MITSUKO, F.; DRESCH, D. M.; PEREIRA, Z. V.; MUSSURY, R. M.; SCALON, L. Q. Gas Exchange in *Caryocar Brasiliense* Cambess Seedlings in Water Deficit Conditions. **Floresta Ambiente**, v. 27, n. 2, p. 1-8, 2020.

SHI, Y. I.; ZHANG, Y.; HAN, W. H.; FENG, R.; HU, Y. H.; GUO, J.; GONG, H. J. Silicon enhances water stress tolerance by improving root hydraulic conductance in *Solanum lycopersicum* L. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, n. 196, p. 1-15, 2016.

SILVA, E. M.; LIMA, G. S.; GHEYI, H. R.; NOBRE, R. G.; SÁ, F. V. S.; SOUZA, L. P.; SOARES, L. A. A.; FERNANDES, P. D. Photosynthetic pigments and photochemical efficiency in soursop under saline water irrigation and nitrogen sources. **Journal of Agricultural Science**, v. 9, n. 12, p. 325-334. 2017.

SILVA, M. L. S.; RESENDE, J. T. V.; TREVIZAM, A.; SCHWARZ, K. Influência do silício na produção e na qualidade de frutos do morangueiro. **Revista Semina**, v. 34, n. 6, p. 3411-3424, 2013.

SILVERIO, J. M.; ESPÍNDOLA, G. M.; SANTOS, C. C.; SCALON, S. P. Q.; VIEIRA, M. C. Phosphate fertilization and shading on the initial growth and photochemical efficiency of *Campomanesia xanthocarpa* O. Berg. **Floresta**, v. 50, n. 4, p. 1741-1750, 2020.

SOUSA, A. G. O.; FERNANDES, D. C.; ALVES, A. M.; FREITAS, J. B.; NAVES, M. M. V. Nutritional quality and protein value of exotic almonds and nut from the Brazilian Savanna compared to peanut. **Food Research International, Guelph**, v. 44, n. 7, p. 2319-2325, 2011.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 1-888 p.

YI, Z.; YU, S.; HAI-JUN, G.; HAI-LIANG, Z.; HUAN-LI, L.; YAN-HONG, H.; YI-CHAO, W. Beneficial effects of silicon on photosynthesis of tomato seedlings under water stress. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 17, n. 10, p. 2151–2159, 2018.

ZANÃO JÚNIOR, L. A.; ALVAREZ, V. H.; CARVALHO-ZATÃO, M. P.; FONTES, R. L. F.; GROSSI, J. A. S. Produção de rosas influenciada pela aplicação de doses de silício no substrato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 6, p. 1611-1619, 2013.

CAPÍTULO I

SILÍCIO ALIVIA O DÉFICIT HÍDRICO E CONTRIBUI NA RECUPERAÇÃO DE MUDAS DE *Dipteryx alata*

SILÍCIO ALIVIA O DÉFICIT HÍDRICO E CONTRIBUI NA RECUPERAÇÃO DE MUDAS DE *Dipteryx alata*

Resumo

O déficit hídrico vem ocasionando sérios problemas no crescimento e desenvolvimento das plantas, fazendo com que ocorram danos no seu metabolismo e, por isso, faz-se necessário o uso de agentes/tecnologias que possam mitigar este problema. Objetivou-se neste estudo verificar o potencial do silício de mitigar os efeitos estressantes do déficit hídrico em mudas de *Dipteryx alata*, e auxiliar na recuperação após a retomada da irrigação. Foram estudados quatro regimes hídricos: irrigação contínua – I: déficit hídrico – II + Si 0, déficit hídrico + 0,75 mL de Si e déficit hídrico + 1;50 mL de Si. As mudas foram avaliadas em quatro períodos: (1) (T0 – tempo zero) início do experimento, período antes de iniciar a suspensão da irrigação, (2) (F0) quando os valores da fotossíntese nas mudas sob suspensão da irrigação chegaram próximos à zero, quando ocorreu a retomada da irrigação; (3) (REC) quando os valores de *A* alcançaram valores próximos ao das mudas sob irrigação contínua, caracterizando o período de recuperação e (4) período (POS-REC) 45 dias após a REC, quando as mudas foram mantidas sob irrigação contínua neste período, semelhante ao controle. A aplicação de 0,75 mL de Si propicia diminuição nos danos ao aparato fotossintético das mudas de *D. alata* por maior período sob déficit hídrico e contribui na recuperação fisiológica de maneira mais rápida após a retomada da irrigação.

Palavras-chaves: Atenuação de estresse ambiental, baru, estresse hídrico, fluorescência da clorofila *a*, trocas gasosas.

3.1. Introdução

As mudanças climáticas têm promovido alterações na disponibilidade hídrica no solo em diversas regiões, especialmente nas tropicais e subtropicais. Em algumas destas regiões, esta mudança tem propiciado o déficit hídrico que é um fator limitante para o crescimento e desenvolvimento inicial das plantas, podendo ocasionar danos aos processos fisiológicos e bioquímicos (SAUD et al., 2014). Sob este déficit ocorre a redução do potencial hídrico e osmótico, assim como a perda da resistência hidráulica nos vasos do xilema e da turgescência celular, comprometendo a capacidade fotossintética das plantas (CHANG-JUAN et al., 2012; AHMED et al., 2013; NUNES et al., 2019).

Nesse contexto, a busca por técnicas para atenuar os danos promovidos pelo déficit hídrico em mudas de espécies arbóreas tem aumentado. Uma das técnicas nos últimos anos é o uso do silício (Si) vem ganhado destaque quanto ao seu potencial em mitigar os múltiplos estresses abióticos, especialmente o déficit hídrico, em diferentes espécies cultivadas (ADREES et al., 2015; RIZWAN et al., 2015; WANG et al., 2017), entretanto são escassos os relatos com espécies arbóreas.

O Si é classificado como nutriente benéfico ao desenvolvimento vegetal, pois apresenta importante função no metabolismo fotossintético e aspectos morfoanatômicos (LIANG et al., 2015), pois propicia aumento da rigidez da parede celular e na resistência mecânica das plantas (KIM et al., 2016). Além disso, o Si pode aumentar a atividade de enzimas antioxidantes capazes de reduzir as espécies reativas de oxigênio (EROS), (TORABI et al., 2015; TRIPATHI et al., 2017), minimizando o estresse oxidativo.

Dentre as espécies arbóreas e frutíferas de importância socioeconômica e ambiental, o baru (*Dipteryx alata* Vog., *Fabaceae) é* nativo da região central brasileira, encontrado em áreas de Cerrado e Cerradão, assim como na transição entre Mata e Cerrado (HONORIO et al., 2019). A espécie é mais encontrada em solos bem drenados e possui valor comercial devido ao uso da madeira na construção civil e de seus frutos na elaboração de doces, geleias ou consumido *in natura* (COSTA et al., 2015). Suas mudas podem ser utilizadas na recuperação de áreas degradadas, enriquecimento de matas nativas ou sistemas agroflorestais. Entretanto, sua exploração é efetuada em áreas nativas sendo escassas as informações sobre sua biologia e manejo para utilização sustentável (AJALLA et al., 2012), o que a torna uma espécie ameaçada de extinção devido ao extrativismo predatório (HONORIO et al., 2019).

Nesse estudo, a hipótese é que o metabolismo fotossintético e o crescimento das mudas dessa espécie são prejudicados pelo déficit hídrico, porém a aplicação de silício via foliar pode contribuir para aliviar o estresse e manter a estabilidade do metabolismo e da qualidade das mudas.

Portanto, objetivou-se avaliar o potencial do silício para mitigar os efeitos do déficit hídrico, na estabilização do metabolismo fotossintético e crescimento das mudas de *D. alata*, e auxiliar na recuperação após a retomada da irrigação.

3.2. Material e Métodos

Condições gerais

O experimento foi desenvolvido no período de novembro de 2019 a janeiro de 2020, na Faculdade de Ciências Agrárias, da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), em Dourados – Mato Grosso do Sul (MS), em viveiro sob 30% de sombreamento utilizando tela de nylon preta (Sombrite®) e cobertura plástica adicional superior e lateral para proteção contra precipitações.

Os frutos maduros de *D. alata* foram coletados de várias matrizes localizadas em área de Cerrado, na região do assentamento Itamarati (22º 11` 24.731” S 55º 35` 37.370” E), Ponta Porã, MS, os quais foram beneficiados manualmente, e as sementes extraídas foram semeadas diretamente em vasos plásticos com capacidade de 8 L, preenchidos com Latossolo Vermelho Distroférrico + areia grossa (3:1, v/v), permanecendo com irrigações diárias de 75% da capacidade de retenção de água por 75 dias, momento em que as mudas apresentaram altura média de 20 cm.

Regimes hídricos, aplicação de Si e período de avaliação

Aos 75 dias após a semeadura (DAS), as mudas foram separadas em quatro grupos e mantidas nos seguintes regimes hídricos: R1) Irrigação contínua – I: manteve-se 75% da capacidade de retenção de água no substrato por meio do método gravimétrico (SOUZA et al., 2000); R2) Déficit hídrico – II, caracterizado pela suspensão da irrigação; R3) Déficit hídrico II + 0,75 mL de Si e R4) Déficit hídrico II + 1,50 mL de Si. A aplicação do Si foi realizada no período matutino, via pulverização foliar de forma única até o ponto de gotejamento (20 mL por planta), e no mesmo dia realizou-se a suspensão da irrigação das mudas.

O Silício (SiO_2) utilizado foi obtido do produto comercial Agri Sil®. Fertilizante Foliar sendo fonte de silício. O produto possui densidade 2,65 g/cm^{-3}, massa molar 60,08 g/mol, sólido transparente (pó branco).

As mudas foram avaliadas em quatro períodos:

1) início do experimento (T0 – tempo zero), período antes de iniciar a suspensão da irrigação;

2) quando os valores da fotossíntese nas mudas sob suspensão da irrigação chegaram próximos à zero (F0), quando ocorreu a retomada da irrigação;

3) quando *A* alcançaram valores próximos ao das mudas sob irrigação contínua (REC), caracterizando o período de recuperação;

4) 45 dias após a REC (POS-REC) quando as mudas foram mantidas sob irrigação contínua, semelhante ao controle.

Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado com os tratamentos arranjados em esquema de parcelas subdivididas, sendo que a combinação dos regimes hídricos com o silício alocados nas parcelas, e os quatros períodos de avaliações nas subparcelas, com três repetições e duas plantas por vaso por unidade experimental.

Características avaliadas

Trocas gasosas: a fotossíntese (*A;* µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}), condutância estomática (*gs*; mol H_2O m^{-2} s^{-1}), concentração interna de CO_2 (C_i; µmol CO_2 m^2 s^{-1}) e a taxa de transpiração nas folhas (*E*; mol H_2O m^{-2} s^{-1}) foram quantificadas utilizando-se o analisador de gás infravermelho - IRGA (ADC, LCi PRO; Analytical Development Co. Ltda., Hoddesdon, UK). A partir desses dados foi calculada a eficiência de carboxilação da Rubisco (A/C_i; µmol CO_2/mmol H_2O) e do uso da água (*EUA*; µmol CO_2/mmol H_2O). As avaliações foram realizadas no período entre as 8 e 11 horas da manhã, selecionando-se quatro mudas por tratamento previamente marcadas.

Fluorescência da clorofila-*a*: as leituras foram realizadas entre 8 e 11 horas da manhã, submetendo as folhas à condição de escuro por 30 minutos, utilizando clips adaptadores, para que todos os centros de reação adquirissem a configuração "aberta", indicando a oxidação completa do sistema de transporte de elétrons fotossintético. Após esse período foi mensurada a fluorescência inicial (F_0), a máxima (F_M) da clorofila-*a*,

eficiência quântica potencial fotoquímica do fotossistema II (F_V/F_M), eficiência de conversão de energia absorvida (F_V/F_0) e a produção quântica basal dos processos não fotoquímicos (F_0/F_M) utilizando fluorímetro portátil modelo OS-30p (Opti-Sciences Chlorophyll Fluorometer, Hudson, USA).

Conteúdo relativo de água das folhas (CRA; %): o CRA foi realizado de acordo com a metodologia de Slavick (1979).

Crescimento em superfície/área: A área foliar (cm^2) foi determinada com integrador de área foliar LI-COR® (LI 3100, Nebraska – USA). O índice de qualidade das mudas foi calculado conforme proposta de Dickson et al. (1960).

Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e quando significativo (teste F, $p < 0,05$), as médias em função dos regimes hídricos, períodos de avaliação e as interações foram submetidas ao teste de Tukey ($p < 0,05$), utilizando o programa estatístico SISVAR 5.3 (FERREIRA, 2019).

3.3. Resultados

Observa-se que durante a suspensão da irrigação, as mudas de *D. alata* sob déficit hídrico tratadas com 1,50 mL Si atingiram fotossíntese próximo a zero F0 (0,59 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}) aos 16 dias, enquanto que as sem Si e com 0,75 mL Si apresentaram valores de F0 aos 18 e 20 dias de restrição hídrica, com valores de 0,43 e 0,48 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}, respectivamente (Figura 1).

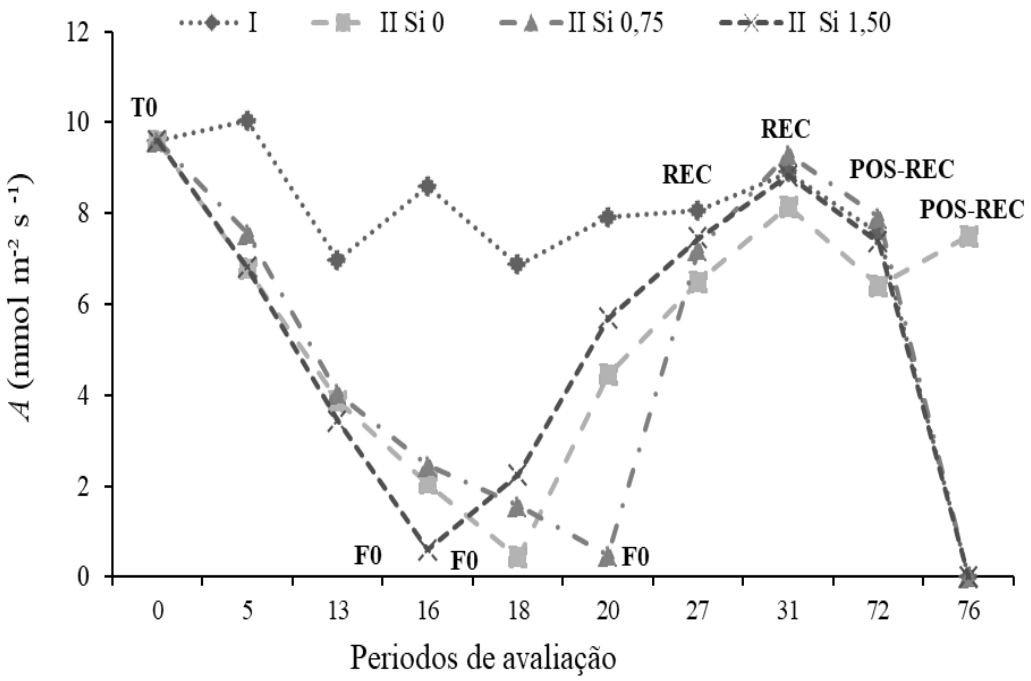
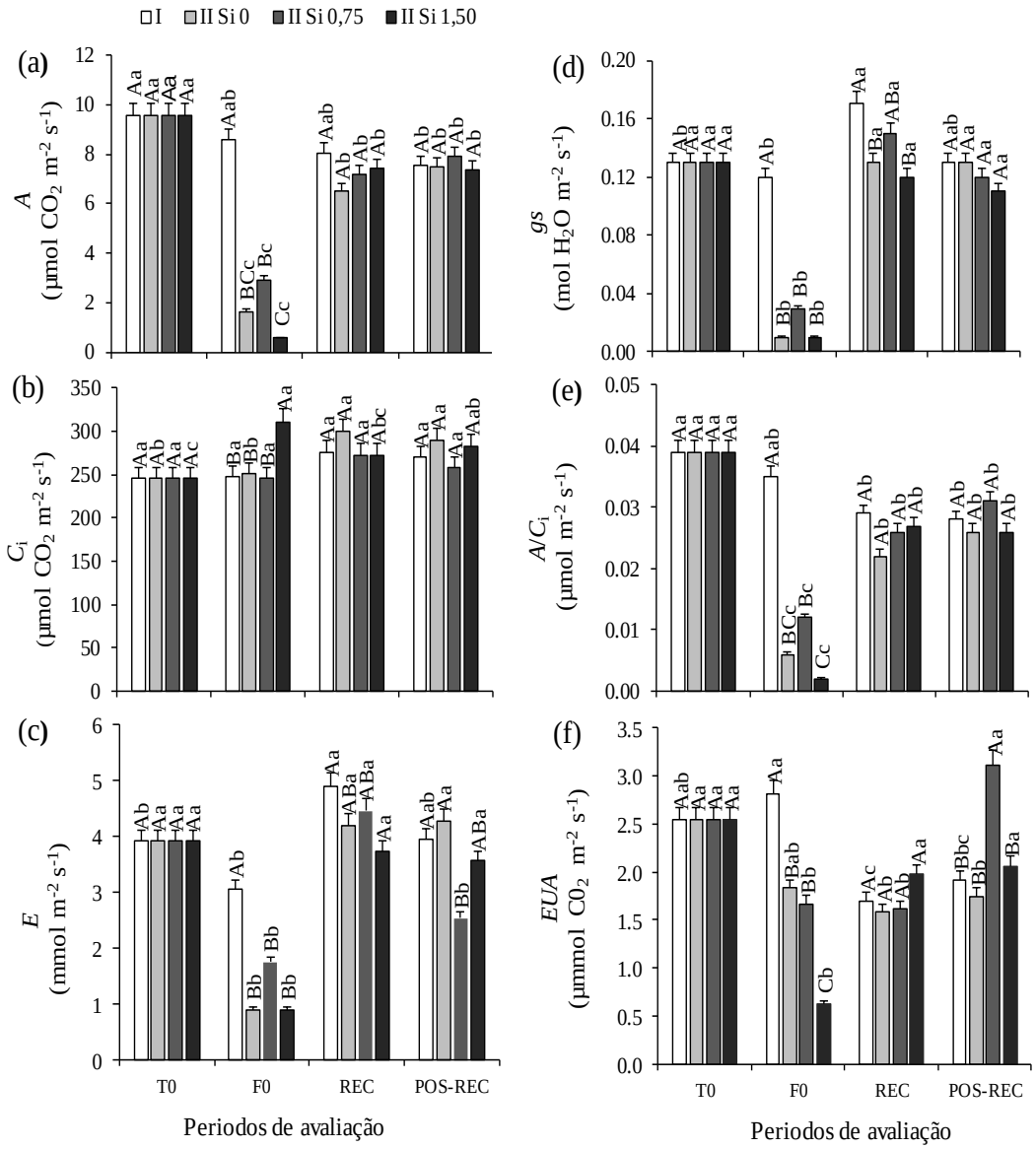


Figura 1. Dinâmica da fotossíntese (*A*) em mudas de *D. alata* produzidas sob diferentes regimes hídricos (I: Irrigada; II: irrigação intermitente combinada sem e com 0,75 e 1,50 de Si) em diferentes períodos de avaliação (T0: tempo zero; F0: fotossíntese próximo a zero; REC: recuperação: POS-REC: período após a recuperação).

Na fase de recuperação (REC), as mudas tratadas com Si tiveram valores de *A* próximos aos das mudas controle aos 11 dias de retomada da irrigação (27º dia de experimento), enquanto que as mudas não tratadas se recuperaram somente aos 15 dias (31º dia). No POS-REC, todas as mudas apresentaram valores de *A* semelhantes ao das mudas controle, sendo que aquelas não tratadas demoraram 4 dias a mais para se recuperar em comparação aos que receberam aplicação de Si.

Aos 16 dias de suspensão hídrica, as mudas de *D. alata* cultivadas com 1,50 mL de Si tiveram fotossíntese (*A*) de 0,59 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1} na F0 (Figura 2a), enquanto que aquelas com 0,75 mL de Si mantiveram valores de *A* mais elevada (2,93 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}) embora não diferiram das mudas sob déficit sem Si nesse mesmo período. Foi observado que os valores não variaram em função das doses de Si na REC e no POS-REC.



*Letras maiúsculas comparam os regimes hídricos dentro cada período de avaliação (Tukey; $p < 0,05$).

Letras minúsculas comparam os períodos avaliação dentro de cada regime hídrico (Tukey; $p < 0,05$).

Figura 2. Fotossíntese – *A* (a), concentração intracelular de CO_2 – C_i (b), transpiração – *E (*c), condutância estomática – *gs* (d), eficiência intrínseca de carboxilação da Rubisco A/C_i (e) e eficiência do uso da água – *EUA* (f) em mudas de *D. alata* produzidas sob diferentes regimes hídricos (I: Irrigada; II: irrigação intermitente combinada sem e com 0,75 e 1,50 de Si) em diferentes períodos de avaliação (T0: tempo zero; F0: fotossíntese próximo a zero; REC: recuperação: POS-REC: período após a recuperação).

Observamos maior concentração intracelular de CO_2 (C_i) (311,25 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}) e menor eficiência de carboxilação da Rubisco (A/C_i) (0,002 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}) nas mudas cultivadas com 1,50 mL de Si na F0, enquanto que as mudas que receberam 0,75 mL de Si tiveram melhores resultados. Na REC e no POS-REC, os valores dessas

características foram semelhantes entre os tratamentos independente do uso do silício e regimes hídricos (Figura 2b e 2e).

Verificamos menores valores da transpiração (*E*) nas mudas sob déficit hídrico, independente do uso do Si durante a F0 (Figura 2c), enquanto que no POS-REC, as mudas com 0,75 mL de Si tiveram menor *E* (2,54 mmol m^{-2} s^{-1}). Quanto à condutância estomática (*gs)*, na F0 foi possível verificar redução nas mudas cultivadas sob déficit hídrico, independente do Si. Na REC, as mudas que receberam 0,75 mL de Si apresentaram valores de *gs* semelhantes das mudas sob controle (Figura 2d).

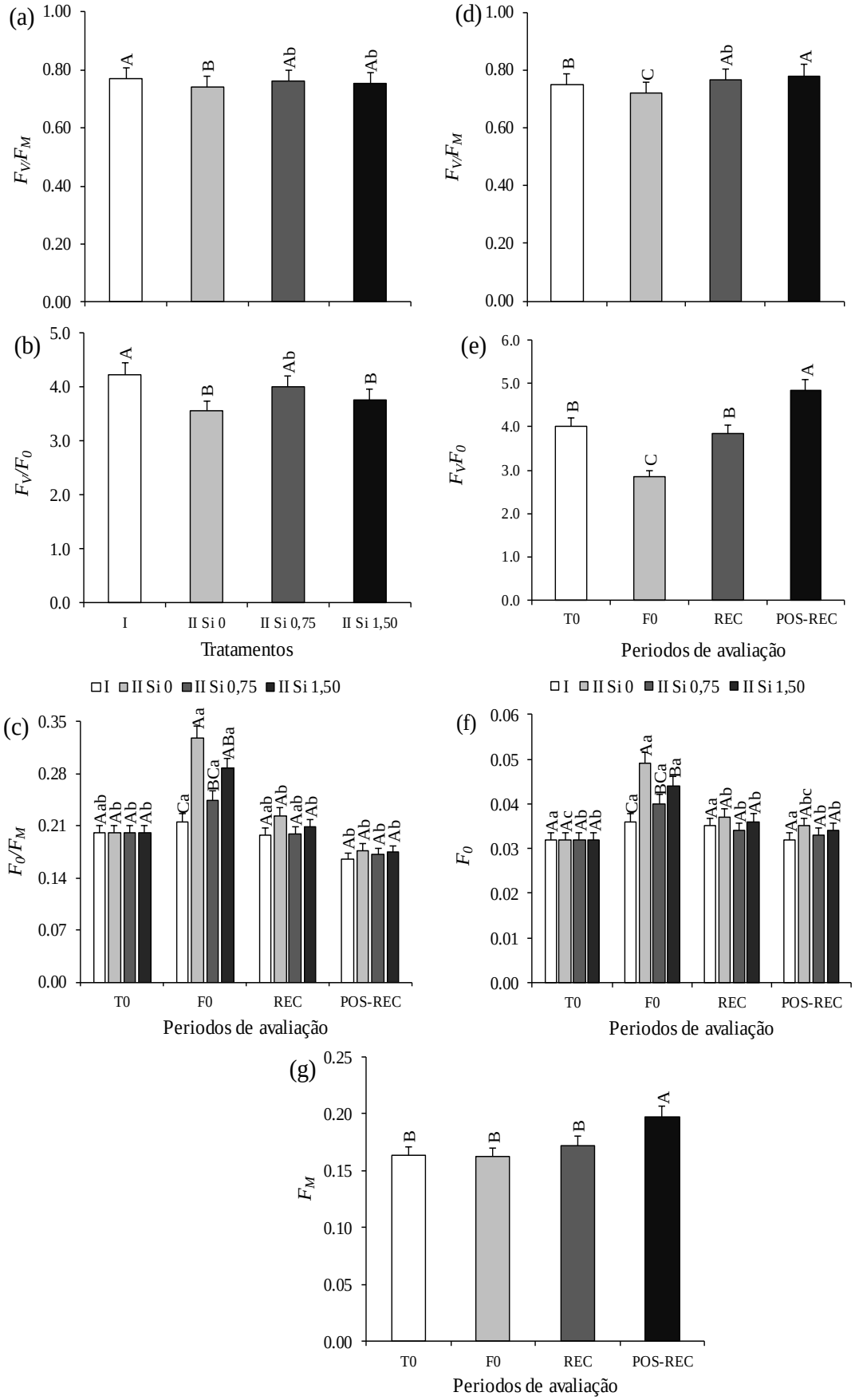
As mudas cultivadas sob déficit hídrico sem e com 0,75 mL de Si tiveram maiores valores de eficiência do uso da água (*EUA)* (1,83 e 1,67 µmol CO_2 m^{-2} $s^{-}1$) na F0, diferindo daquelas que receberam 1,50 mL de Si nesse mesmo período de avaliação. Na REC, os valores foram semelhantes ao das mudas controle e na POS-REC as mudas com 0,75 mL de Si tiveram maior *EUA* (3,12 µmol CO_2 m^{-2} $s^{-}1$) (Figura 2f).

As mudas sob déficit hídrico sem Si tiveram menor eficiência quântica potencial no fotossistema II (F_V/F_M) (0,740) na F0, mas a aplicação de 0,75 mL de Si promoveu maior valor (0,761) de F_V/F_M nas mudas submetidas ao déficit hídrico, não diferindo das mudas controle (Figura 3a). Durante F0, o valor de F_V/F_M foi reduzido (0,723) (Figura 3d). Após o restabelecimento da irrigação em (REC e POS-REC) as plantas conseguiram normalizar sua atividade fotoquímica, onde atingiram um valor superior ao controle.

Os maiores valores de eficiência de conversão de energia absorvida (F_V/F_0) foram observados nas mudas controle cultivadas sob irrigação contínua e naquelas produzidas com 0,75 mL de Si com valores de (4,22 e 3,99) (Figura 3b). Durante F0, as mudas estressadas apresentaram menor valor de (F_V/F_0) (3,85), após o reinicio da irrigação, as mudas recuperaram (REC) o valor de F_V/F_0, onde não diferiram das mudas do momento inicial (Figura 3e).

Durante F0, a relação F_0/F_M e os valores de F_0 foram maiores nas mudas cultivadas sem Si e menores nas mudas tratadas com 0,75 mL de Si (Figura 3c e 3f). Nos períodos REC e POS-REC, os valores das mudas previamente estressadas permaneceram próximos aos das mudas controle e das mudas tratadas com Si.

As mudas estressadas apresentaram maiores valores de Fm nas avaliações (POS-REC) com média (0,197) (Figura 3g). Após a retomada da irrigação (REC e POS-REC), as mudas de *D. alata* previamente estressadas foram recuperadas.

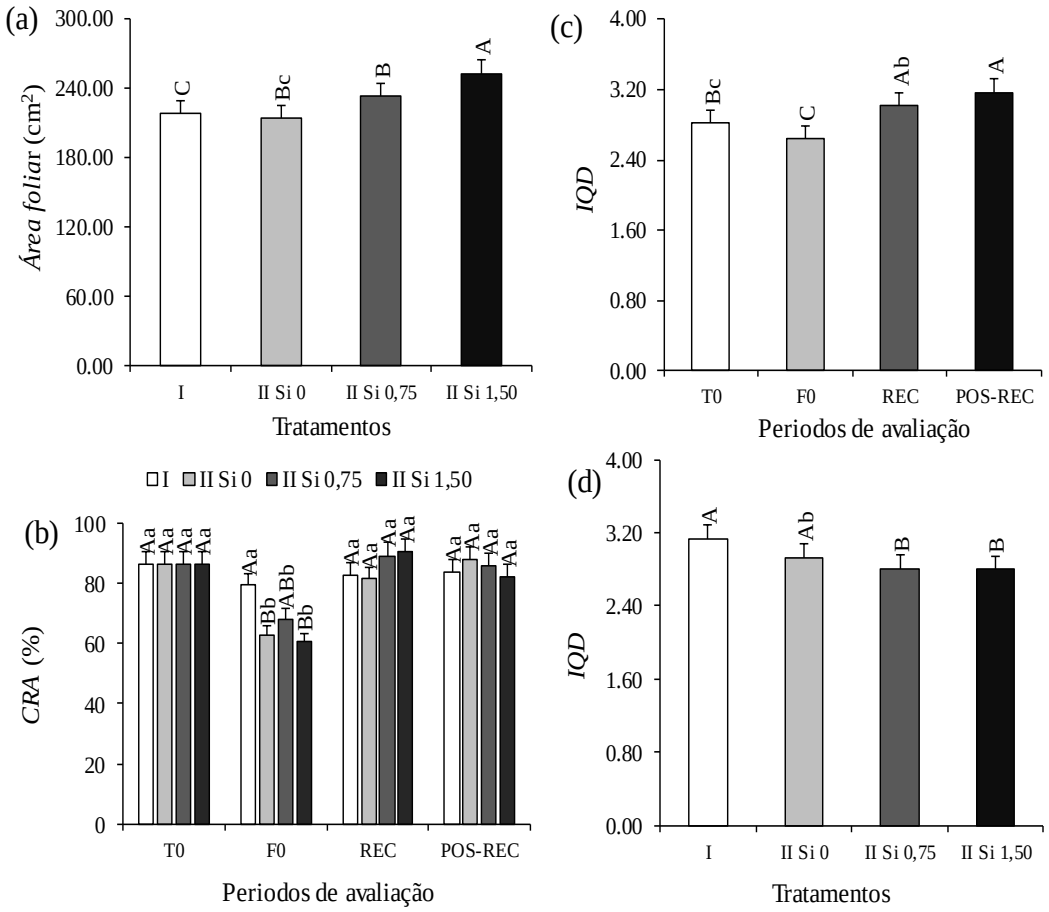


*Letras maiúsculas comparam os regimes hídricos dentro cada período de avaliação (Tukey; $p < 0.05$).

Letras minúsculas comparam os períodos avaliação dentro de cada regime hídrico (Tukey; $p < 0.05$).

Figura 3. Eficiência quântica potencial do fotossistema II - F_V/F_M (a e d), eficiência de conversão de energia absorvida - F_V/F_0 (b/e), produção quântica basal dos processos não fotoquímicos - F_0/F_M (b), fluorescência inicial F_0 (e) e fluorescência máxima da clorofila-*a* F_M (f) em mudas de *D. alata* produzidas sob diferentes regimes hídricos (I: Irrigada; II: irrigação intermitente combinada sem e com 0,75 e 1,50 de Si) em diferentes períodos de avaliação (T0: tempo zero; F0: fotossíntese próximo a zero; REC: recuperação: POS-REC: período após a recuperação).

A área foliar das mudas em déficit hídrico não variou daquela das mudas controle durante a F0 (Figura 4a), com média de 214,87 cm^2. Quanto ao conteúdo relativo de água das folhas (CRA), às mudas sob déficit hídrico cultivadas sem Si e com 1,50 mL de Si apresentaram valores inferiores, enquanto aquelas tratadas com 0,75 mL de Si (68,16%) não diferiram das mudas controle (Figura 4b). Na REC e POS-REC, o CRA de todas as mudas foi semelhante e não variou entre os tratamentos. Isso demonstra a recuperação dessa característica após a retomada da irrigação.



*Letras maiúsculas comparam os regimes hídricos dentro cada período de avaliação (Tukey; $p < 0.05$).

Letras minúsculas comparam os períodos avaliação dentro de cada regime hídrico (Tukey; $p < 0.05$).

Figura 4. Área foliar (a), conteúdo relativo de água das folhas CRA (b) e índice de qualidade de Dickson IQD (c e d) em mudas de *D. alata* produzidas sob diferentes regimes hídricos (I: Irrigada; II: irrigação intermitente combinada sem e com 0,75 e 1,50 de Si) em diferentes períodos de avaliação (T0: tempo zero; F0: fotossíntese próximo a zero; REC: recuperação: POS-REC: período após recuperação).

Durante o F0, o valor de IQD foi menor sob condições de estresse, após a retomada da irrigação no período REC e POS-REC, todas as mudas apresentaram valores semelhantes de IQD (Figura 4c). As mudas tratadas com Si apresentaram valores de índice de qualidade de Dickson (IQD) menores que os das mudas controle durante sua avaliação, e similares aos valores das mudas sem Si (Figura 4d).

3.4. Discussão

Aceita-se a hipótese de que o déficit hídrico promove alterações na capacidade de absorção da energia luminosa e nas trocas gasosas das mudas de *D. alata* e que as mudas tratadas com silício especialmente na dose de 0,75 mL apresentam melhor desempenho fisiológico e de crescimento inicial sob este estresse.

As mudas de *D. alata* apresentaram sensibilidade ao déficit hídrico uma vez que a baixa disponibilidade hídrica ocasionou diversos danos fisiológicos às plantas, tais como a redução do conteúdo relativo de água no tecido e a condutância estomática (g_s), afetando negativamente as trocas gasosas, aumentando a $C_{i,}$ reduzindo a taxa de assimilação de CO_2 e consequentemente reduzindo a A/C_i. Esse comportamento pode ser atribuído ao aumento da produção de espécies reativas de oxigênio, as quais não foram apresentadas neste trabalho, e que, segundo a literatura, comprometem a integridade do aparato fotossintético (PEREIRA et al., 2012; VÍTOLO et al., 2012). O Si quando utilizado em doses adequadas, aqui representado pela dose de 0,75 mL minimizou o efeito negativo provocado pelo déficit hídrico nas mudas, diminuindo os danos ao aparato fotossintético. Além disso, as mudas cultivadas nessa condição tiveram a recuperação da *A* mais rápida quando comparadas aos demais tratamentos na REC.

Ressalta-se que a dose de 0,75 mL contribuiu para que a redução da *A* fosse menor sob déficit hídrico, demonstrando seu potencial como agente mitigador do estresse hídrico, mas em doses adequadas. O Si promove benefícios na capacidade de eliminação de espécies reativas de oxigênio, por meio de regulação da atividade de enzimas antioxidante de defesa em plantas sob estresses abióticos (KIM et al., 2016;

TRIPATHI et al., 2017), reduzindo os danos oxidativos e favorecendo a integridade das membranas (MAGHSOUDI et al., 2016) e a estabilidade do metabolismo foliar (SHI et al., 2016) em diferentes espécies como *Solanum lycopersicum e Triticum aestivum.*

Além disso, os efeitos benéficos do silício na fotossíntese sob seca, foram observados em diferentes espécies, sugerindo que o Si pode atuar na melhoria do status hídrico das plantas (ZHU e GONG, 2014; ETESAMI e JEONG, 2018), embora em *D. alata*, o CRA nas folhas tenha reduzido nos momentos de maior déficit hídrico (F0), com a retomada da irrigação as mudas recuperaram a turgescência com valores significativamente superiores quando comparados ao das mudas sem Si.

A redução mais rápida e acentuada da *A* com 1,50 mL de Si, possivelmente indica efeito fitotóxico o que foi comprovado por alguns parâmetros da fluorescência da clorofila *a* aqui avaliados. Moraes et al. (2011) verificaram que em cana-de-açúcar tratadas com doses crescentes de silício, doses superiores a 40 g L^{-1} aplicado via foliar, provocaram efeito fitotóxico para a espécie fazendo com que ocorresse redução da área foliar.

Embora a aplicação de 0,75 mL de Si tenha promovido numericamente maiores valores de *A, E, gs* e A/C_i do que das mudas cultivadas com 1,50 mL de Si, sugerimos que o Si pouco contribuiu na manutenção das trocas gasosas durante o período de estresse (F0), pois não diferiram estatisticamente das plantas que não receberam a aplicação do agente mitigador.

Ressaltamos que mesmo pouco contribuindo na F0, a aplicação de 0,75 mL de Si contribuiu positivamente no incremento de g_s e *EUA* nas épocas de REC e POS-REC, respectivamente, indicando o efeito prolongado desse elemento sobre o metabolismo foliar e suas relações hídricas. O fato das mudas de *D. alata* pouco responderem ao silício pode estar associado à capacidade da planta ser acumuladora de Si, ou seja, a maioria dos estudos encontrados na literatura é realizada em plantas acumuladoras de Si, enquanto que menos trabalhos abordam plantas não acumuladoras de Si (ZANG et al., 2018). Esses resultados indicam que o Si pode mitigar os efeitos deletérios causados pelo estresse hídrico em plantas não acumuladoras de Si.

Na literatura, foram verificados resultados positivos da aplicação de Si no aumento das trocas gasosas em *Glycine max*, *Triticum aestivum* L. e *Oryza sativa L.* (SHEN et al., 2010; GONG e CHEN, 2012; SONG et al., 2014), diferentes aos observados para as mudas de *D. alata* em nosso estudo, sugerindo que mais estudos precisam ser realizados com espécies arbóreas.

Os parâmetros de fluorescência da clorofila-*a* como F_v/F_M e F_v/F_0 reduziram nas mudas de *D. alata* durante o déficit hídrico (F0). Song et al. (2014) afirmam que a diminuição da eficiência fotoquímica do fotossistema II sob restrição hídrica pode ser devido á redução do teor de clorofila e outros parâmetros fisiológicos. Outras espécies, como *Jatropha curcas* L. (MOURA et al., 2016) e *Hymenaea courbaril* L. (FREITAS et al., 2019) e *Campomanesia Xanthocarpa* (Mart.) O. Berg (BARTIERES et al., 2021) também apresentaram redução da F_v/F_M e F_v/F_0 quando cultivadas sob déficit de água.

A aplicação do Si, especialmente na dose de 0,75 mL de Si contribuiu para a estabilidade dos processos fotoquímicos da fotossíntese, uma vez que aliviou o efeito negativo do déficit hídrico. De maneira semelhante, mudas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) (ZANG et al., 2018) tiveram melhores resultados quando tratadas com silício mesmo durante o déficit hídrico.

O silício atua melhorando as funções fisiológicas nas plantas e regulando a distribuição positiva de mineral nas folhas, caules e raízes, podendo proteger as plantas do estresse hídrico, enquanto diminui a produção de EROS, o que reduz o estresse oxidativo das plantas, resposta relatada para algumas espécies (*Triticum aestivum* e *Brassica napus L)* (TRIPATHI et al., 2016; HASANUZZAMAN et al., 2017a; TRIPATHI et al., 2017). Além disso, o Si contribui no aumento da absorção de água pelas raízes em *Sorghum bicolor* (LIU et al., 2014) e estimula o acúmulo de osmolitos em *Oryza sativa* (MING et al., 2012); devemos ressaltar que a maioria dessas respostas foram observadas em gramíneas que são espécies acumuladores de Si (ZHU e GONG, 2014).

Os maiores rendimentos dos processos não fotoquímicos (F_0/F_M) e F_0 nas mudas sob déficit hídrico sem e com 1,50 mL de Si devem-se ao baixo aproveitamento da energia luminosa pelas plantas, o que comprometeu a transferência de elétrons, para o centro de reação. O aumento dessas características indica condição estressante, reduzindo as atividades fotoquímicas, especialmente da F_V/F_M e das trocas gasosas nas mudas de *D. alata*. Esses danos nas atividades FS II prejudicam a capacidade fotossintética (*A*) das plantas em função da redução do potencial hídrico foliar (CRUZ et al., 2009) o que reflete na qualidade (IQD) das mudas. A aplicação de Si favoreceu a estabilidade fotoquímica por promover a integridade da membrana e diminuir sua permeabilidade (LIANG et al., 2015b). Kim et al. (2017), relatam que ao modular os sistemas de defesa antioxidante, o Si também pode aliviar o estresse oxidativo em plantas sob condições adversas.

A redução da área foliar de plântulas de *D. alata* durante o F0 indica que o tempo em que as plantas foram submetidas ao estresse afetou negativamente a absorção de luz e, consequentemente, as funções metabólicas e fisiológicas das plantas sob condições de estresse hídrico. Após a reidratação, a área foliar foi estabelecida, provocando a retomada das atividades metabólicas e fisiológicas das mudas.

A estabilidade da área foliar das mudas de *D. alata* sob suspensão do regime hídrico em F0 se deve ao fato desta espécie apresentar um crescimento inicial lento, e o tempo em que as mudas foram submetidas ao estresse não foi suficiente para um aumento desta variável.

Entretanto, as respostas quanto à área foliar variam entre as espécies. Por exemplo, mudas de *Schinus terebinthifolia* Raddi (BELTRAMIN et al., 2020), *Cedrela odorata* L. (SILVA et al., 2021) e *Campomanesia xanthocarpa* O. Berg. (SANTOS et al., 2021), tiveram redução em AF sob baixa disponibilidade hídrica.

Embora não tenha ocorrido redução dos caracteres de crescimento observamos redução do CRA nas mudas sem e com 1,50 mL de Si, demonstrando sensibilidade da espécie a essas condições de cultivo. Os menores valores indicam perda da turgescência, afetando negativamente a produção de fotoassimilados. Porém, a dose 0,75 mL de Si contribuiu na manutenção do CRA e maior EUA, especialmente na F0 e POS-REC consequentemente estabilizando os demais processos metabólicos.

Conforme observado na literatura, também comprovamos em *D. alata* que a baixa disponibilidade hídrica afeta negativamente o potencial hídrico foliar (CRUZ et al., 2009), promovendo danos nos processos metabólicos, o que ocasionou em menor produção de fotoassimilados e crescimento inicial, consequentemente houve a redução na qualidade das mudas (IQD), entretanto, o Si contribui no ajuste osmótico e gradiente do potencial hídrico (SONOBE et al., 2010; CHEN et al., 2018). O Si deposita-se na forma de sílica amorfa, formando uma barreira de proteção sobre o poro estomático (AHMED et al., 2013; FÁTIMA et al., 2019). Assim, mesmo sob déficit hídrico, a aplicação de 0,75 mL de Si promoveu regulação do crescimento das mudas, tanto na F0 quanto na REC uma vez que o Si reduz a lignificação em tecidos e pode facilitar o relaxamento da parede celular e extensibilidade e promover maior crescimento da planta sob condições de estresse (MAKSIMOVIĆ et al., 2007).

Ressaltamos que após a retomada da irrigação (REC) até o POS-REC das avaliações, as mudas de *D. alata* previamente submetidas ao déficit hídrico apresentaram valores de todas as características avaliadas nesse trabalho semelhantes ao

das mudas controle. Esse comportamento sugere que essa espécie apresenta plasticidade fisiológica, resposta importante e desejável uma vez que ela é encontrada em áreas sujeitas a condições estressantes, causadas pelas grandes variações de temperaturas, disponibilidades hídricas e luminosas.

Sugerimos assim, que as mudas de *D. alata* apresentam alta capacidade de resiliência em função de plasticidade fisiológica e esse comportamento é importante em projetos de recuperação de áreas degradadas uma vez que, geralmente, em áreas antropizadas há oscilações quanto à disponibilidade hídrica no solo, e essa resiliência contribui no potencial de sobrevivência dessa espécie.

3.5. Conclusões

A aplicação de 0,75 mL de Si propicia diminuição nos danos ao aparato fotossintético das mudas de *D. alata* por maior período sob déficit hídrico, e contribui na recuperação fisiológica de maneira mais rápida após a retomada da irrigação.

Durante o POS-REC todas as mudas recuperaram seu potencial fisiológico e de crescimento.

3.6. Referências

ADREES, M.; ALI, S.; RIZWAN, M.; ZIA-UR-REHMAN, M.; IBRAHIM, M.; ABBAS, F.; FARID, M.; QAYYUM, M. F.; IRSHAD, M. K. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v.22, n. 11, p. 8148-8162, 2015.

AJALLA, A. C. A.; VOLPE, E. VIEIRA, M. C.; ZÁRATE, N. A. H. Production of baru (*Dipteryx alata* Vog.) seedlings under three levels of shading and four textural classes of soil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 34, n. 3, p. 888-896, 2012.

AHMED, M.; KAMRAN, A.; ASIF, M.; QADEER, U.; AHMED, Z. I.; GOYAL, A. Silicon priming: a potential source to impart abiotic stress tolerance in wheat: A review. **Australian Journal Crop Science**, v. 7, n. 4, p. 484-491, 2013.

BELTRAMIN, F. A.; SILVA, W. C.; SANTOS, C. C.; SCALON, S. P. Q.; VIEIRA M. C. Water-retaining polymer mitigates the water deficit in *Schinus terebinthifolia*: photosynthetic metabolism and initial growth. **Engenharia Agrícola**, v. 40, n. 6, p. 684-691, 2020.

CHEN, D.; WANG. S.; YIN, L.; DENG, X. How Does Silicon Mediate Plant Water Uptake and Loss Under Water Deficiency? **Frontiers in Plant Science**, v. 9, n. 281, p. 1-7, 2018.

CRUZ, M. C. M. SIQUEIRA, D. L.; SALOMÃO, L. C. C.; CECON, P. R. Chlorophyll a fluorescence in leaves of 'Ponkan' mandarin and the 'Tahiti' acid lime

submitted to water stress. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 31, n. 3, p. 896-901, 2009.

COSTA, E.; DIAS, J. G.; LOPES, K.G.; BINOTTI, F. F. S.; CARDOSO, E. D. Shading Screens and Substrates for *Dipteryx alata* Vog. Seedling Production**. Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 3, p. 416-425, 2022.

DICKSON, A. LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **The Forestry Chronicle**, v. 36, n.1, p. 10-13, 1960.

ETESAMI, H.; JEONG, B. R. Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. **Ecotoxicology Environmental Safety**, v 147, n. 1, p. 881-896, 2018.

FÁTIMA, R. T, JESUS, E. G, GUERRERO, A. C, ROCHA, J. L. A, BRITO, M. E. B. Silicon Fertilization as Atenuant of Water Stress in *Lettuce* Growth and Gas Exchanges. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 27, n. 2, p. 170-179, 2019.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects Split plot type designs. **Revista Brasileira Biometria**, v. 37, n. 4, 529-535, 2019.

FREITAS, V. M. B.; SCALON, S. P. Q, DRESCH, D. M, BASTOS, S. S, SOUZA, A. P. R. Influence of Exogenous Application of Abscisic Acid in Gas Exchanges of *Hymenaea courbaril* L. (Fabaceae) Seedlings Subjected to Water Deficit. **Floresta**, v. 48, n. 3, p. 363-372, 2018.

GONG H.; CHEN K. The regulatory role of silicon on water relations, photosynthetic gas exchange, and carboxylation activities of wheat leaves in field drought. **Acta Physiologiaea Plantarum**, v. 34, n. 4, p. 1589-1594.

HASANUZZAMAN, M.; NAHAR, K.; ANEE, T. I.; FUJITA, M. Exogenous silicon attenuates cadmium-induced oxidative stress in *Brassica napus* L. by modulating ASA-GSH pathway and glyoxalase system. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, n. 1061, p. 1-9, 2017.

HONÓRIO, A. B. M.; LOPES.; M. B. S.; SIEBENEICHLER, S. C.; SOUZA, C. M.; LEAL, T. C. A. B. Growth analysis and physiological parameters in *Dipteryx alata* Vogel seedlings. **Pesquisa Aplicada e Agrotecnologia**, v. 12, n. 1, p. 41-52, 2019.

KHAMSSI, N. N.; NAJAPHY, A. Comparison of Photosynthetic Components of Wheat Genotypes Under Rain-fed and Irrigated Conditions. **Photochemistry and Photobiology**, v. 88, n. 1, p. 76-80, 2012.

KIM, Y. H.; KHAN, A. L.; WAQAS, M.; LEE, I. J. Silicon Regulates Antioxidant Activities of Crop Plants under Abiotic-Induced Oxidative Stress: A Review. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, n.510, p. 1-7, 2017.

KIM, Y. H.; KHAN, A. L.; WAQAS, M.; SHAHZAD, R.; LEE, I. J. Silicon-mediated Mitigation of Wounding Stress Acts by Up-regulating the Rice Antioxidant. **Cereal Research Communications**, v. 44, n. 1, p. 111–121, 2016.

LIANG, Y.; NIKOLIC, M.; BÉLANGER, R.; GONG, H.; SONG, A. **Silicon in Agriculture From Theory to Practice**. Spring, 2015, 1-250 p.

LIANG, Y.; NIKOLIC, M.; BÉLANGER, R.; GONG, H.; SONG, A. **Silicon-Mediated Tolerance to Other Abiotic Stresses, Silicon in Agriculture**. Springer, 2015b, 161–179 p.

LIU, P.; YIN, L.; DENG, X.; WANG, S.; TANAKA, K.; ZHANG, S. Aquaporin-mediated increase in root hydraulic conductance is involved in silicon-induced improved root water uptake under osmotic stress in (*Sorghum bicolor* L.). **Journal of Experimental Botany**, v. 65, n. 17, p. 4747-4756, 2014.

MAGHSOUDI, K.; EMAM, Y.; PESSARAKLI, M. Effect of silicon on photosynthetic gas exchange, photosynthetic pigments, cell membrane stability and relative water content of different wheat cultivars under drought stress conditions. **Journal of Plant Nutrition**, v. 39, n. 7, p. 1001-1015, 2016.

MAKSIMOVIĆ, J. D.; BOGDANOVIĆ, J.; MAKSIMOVIĆ, V.; NIKOLIC, M. Silicon modulates the metabolism and utilization of phenolic compounds in cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown at excess manganese. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 170, n. 6, p. 739-744, 2007.

MING, D. F.; PEI, Z. F.; NAEEM, M. S.; GONG, H. J.; ZHOU, W. J. Silicon alleviates PEG-induced water-deficit stress in upland rice seedlings by enhancing osmotic adjustment. **Journal of Agronomy and Crop** Science, v. 198, n. 1, p. 14-26, 2012.

MORAES, W. B.; JÚNIOR, W. C. J.; MORAES, W. B.; ARAUJO, G. L.; SOUZA, A. F.; SILVA, M. V. Application of potassium silicate and leaf growth of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, n. 1, p59-64, 2011.

MOURA, A. R.; NOGUEIRA, R. J. M. C.; SILVA, J. A. A.; LIMA, T. V. Water relations and organic solutes in young plants of *Jatropha curcas* L. under different water regimes. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 345-354, 2016.

NUNES, A. M. C.; NUNES, L. R. L.; RODRIGUES, A. J. O.; UCHÔA ,K. S. Silicon In Tolerance To Water Stress In Tomatoes. **Revista Científica Rural**, v. 21, n. 2, p. 239-258, 2019.

PEREIRA W. P.; MELO FILHO P. A.; ALBUQUERQUE M. B.; NOGUEIRA R. J. M. C.; SANTOS R. C. Biochemical changes in peanut genotypes submitted to moderate water stress. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 4, p. 766-773, 2012.

RIZWAN, M. ALI, S. IBRAHIM, M. FARID, M. ADREES, M. BHARWANA, S. A. ZIA-UR-REHMAN, M.; QAYYUM, M. F.; ABBAS, F. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of drought and salt stress in plants: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 20, p. 15416-15431, 2015.

SANTOS, C. C.; SILVERIO, J. M.; SCALON, S. P. Q.; VIEIRA, M. C. Hydrogel and Water Regimes in the ChlorophylL-*A* Fluorescence and Growth of *Campomanesia xanthocarpa* Seedlings. **Engenharia Agrícola**, v. 41, n. 3, p. 330-337, 2021.

SAUD, S.; LI, X.; CHEN, Y.; ZHANG, L.; FAHAD, S.; HUSSAIN, S.; SADIQ, A.; CHEN, Y. Silicon Application Increases Drought Tolerance of Kentucky Bluegrass by Improving Plant Water Relations and Morphophysiological Functions. **The Scientific World Journal**, v. 2014, p 1-10, 2014.

SHI, Y.; ZHANG, Y.; HAN, W.; FENG, R.; HU, Y.; GUO, J.; GONG, H. Silicon enhances water stress tolerance by improving root hydraulic conductance in *Solanum lycopersicum* L. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, n. 196, p. 1-15, 2016.

SHEN, X. ZHOU, Y.; DUAN, L.; LI, Z.; ENEJI, A. E.; LI, J. Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation. **Journal of Plant Physiology**, v. 167, n. 15, p. 1248-1252, 2010.

SILVA, M. S.; SCALON, S. P. Q.; SILVÉRIO, J. M.; SANTOS, J. K. V.; SANTOS, C. C.; DRESCH, D. M. Do Hydro-Retainer Polymers Attenuate Damage from Water Fluctuations in Leaf Metabolism and the Quality of *Cedrela odorata* Seedlings? **International Journal Agriculture e Biology**, v. 26, n. 1, p. 209-216, 2021.

SLAVICK, B. **Methods of Studying Plant Water Relations** (eds) Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1979, 449 p.

SONG, A.; LI, P.; FAN, F.; LI, Z.; LIANG, Y. The Effect of Silicon on Photosynthesis and Expression of its Relevant Genes in Rice (*Oryza sativa L.*) under High-Zinc Stress. **Plos One**, v. 9, n. 11, p. e113782, 2014.

SONOBE, K.; HATTORI, T.; AN, P.; TSUJI, W.; ENEJI, A. E.; KOBAYASHI, S.; KAWAMURA, Y.; TANAKA, K.; INANAGA, S. Effect of Silicon Application on *Sorghum* Root Responses to Water Stress. **Journal of Plant Nutrition**, v. 34, n. 1, p. 71–82, 2010.

SOUZA, C. C.; OLIVEIRA , F. A.; SILVA, I. F.; AMORIM NETO, M. S. Evaluation of methods of available water determinaton and irrigation management in "terra roxa" under cotton crop**. Revista Brasileria Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 3, p. 338-342, 2000.

TORABI, F.; MAJD, A.; ENTESHARI, S. The effect of silicon on alleviation of salt stress in borage (*Borago officinalis* L.). **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 1, n. 1, p. 1-11, 2015.

TRIPATHI, D. K.; SINGH, S.; SINGH, V. P.; PRASAD, S. M.; DUBEY, N. K.; CHAUHAN, D. K. Silicon nanoparticles more effectively alleviated UV-B stress than silicon in wheat (*Triticum aestivum*) seedlings. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 110, p. 70-81, 2017.

TRIPATHI, D. K.; SINGH, S. S.; SINGH, S.; CHAUHAN, D. K.; DUBEY, N. K.; PRASAD, R. Silicon as a beneficial element to combat the adverse effect of drought in agricultural crops. In: Ahmad, P. (eds), **Water Stress and Crop Plants: A Sustainable Approach**. Wiley, Chichester, 2016, 682–694 p.

VÍTOLO, H. F.; SOUZA, G. M.; SILVEIRA, J. A. G. Cross-scale multivariate analysis of physiological responses to high temperature in two tropical crops with C3 and C4 metabolism. **Environmental and Experimental Botany**, v. 80, n. 9, p. 54-62, 2012.

WANG, M.; GAO, L.; DONG, S.; SUN, Y.; SHEN, Q.; GUO, S. Role of Silicon on Plant–Pathogen Interactions. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, n. 1, p. 701-714, 2017.

ZHANG, Y.; SHI, Y.; GONG, H.; ZHAO, H.; LI, H.; HU, Y.; WANG, Y. Beneficial effects of silicon on photosynthesis of tomato seedlings under water stress. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 17, n. 10, p. 2151–2159, 2018.

ZHU, Y.; GONG, H. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. **Agronomy for Sustainable Development**, v.34, n. 2, p. 455–472, 2014.

CAPÍTULO II

SILÍCIO E SOMBREAMENTO ATENUAM OS EFEITOS DO DÉFICIT HÍDRICO SOBRE O METABOLISMO E O CRESCIMENTO FOLIAR DE MUDAS DE *D. alata*

SILÍCIO E SOMBREAMENTO ATENUAM OS EFEITOS DO DÉFICIT HÍDRICO SOBRE O METABOLISMO E O CRESCIMENTO FOLIAR DE MUDAS DE *D. alata*

Resumo

A região do Cerrado vem passando nos últimos anos por baixos índices pluviométricos, ocasionando escassez hídrica que resulta em sérios problemas ao crescimento e desenvolvimento das espécies vegetais presentes nesse bioma, além da redução dos aspectos fisiológicos e bioquímicos das plantas dessa região. Para minimizar este problema de baixo regime hídrico é necessária a utilização de agentes/técnicas que possam mitigar os prejuízos causados às plantas. O objetivo deste estudo foi avaliar o potencial do silício e do sombreamento em mitigar os efeitos deletérios do déficit hídrico sobre o metabolismo fotossintético e crescimento da área foliar das mudas *D. alata* e sobre o potencial de recuperação após suspensão das condições de estresse. As mudas foram separadas em três grupos e foram transferidas para viveiros sob três níveis de sombreamento: 0% (pleno sol), 30% e 70% de sombreamento. Em cada sombreamento as mudas receberam três regimes hídricos: R1) Irrigação contínua – C, R2) Déficit hídrico – E e R3) Suspensão da irrigação E + aplicação do Si 0,75 mL Si. Para caracterização do metabolismo fotossintético, as mudas foram avaliadas no T0 – tempo zero início do experimento, período antes de iniciar a suspensão da irrigação. Após a suspensão da irrigação, as mudas foram avaliadas em dois períodos: (1) (F0) quando os valores da fotossíntese nas mudas sob suspensão da irrigação chegaram próximos à zero, período que ocorreu a retomada da irrigação e (2) (REC) quando os valores de A alcançaram valores próximos ao das mudas sob irrigação contínua, caracterizando o período de recuperação. A interação sombreamento e silício não mitigaram o efeito estressante do déficit hídrico durante a restrição hídrica em mudas de *D. alata*, entretanto, retardaram a redução da fotossíntese e anteciparam sua recuperação. Durante o déficit hídrico o sombreamento de 70% independente da aplicação de silício manteve a expansão da área foliar das mudas, manteve o índice SPAD e as características de fluorescência da clorofila a com valores semelhantes ou superiores e com menor redução do conteúdo relativo de água das folhas. Todas as características avaliadas se recuperaram após a retomada da irrigação no período avaliado, exceto a A/Ci, independente dos tratamentos.

Palavras-chave: Atividade fotoquímica, fotossíntese, área foliar, recuperação, sombra.

4.1. Introdução

O Cerrado brasileiro ocupa uma extensão de aproximadamente 2 milhões de km^2, representando 23% do território nacional brasileiro, com vastos habitats e alta diversidade florística (CÂNDIDO et al., 2016; SILVERIO et al., 2021). Dentre suas espécies nativas, destaca-se o baru (*Dipteryx alata* Vogel-Fabaceae), uma espécie promissora em projetos de recuperação de áreas degradadas, bem como em sistemas agrossilvipastoris e agroflorestais, devido a sua copa densa e arredondada, rápido crescimento, baixa necessidade de fertilização e alta produção de biomassa foliar, que contribui para fixar carbono na atmosfera e fornecer sombra (SANO et al., 2016). Além destes aspectos mencionados anteriormente, os frutos desta espécie apresentam alto valor com muitos usos na culinária e, portanto, a implantação de pomares comerciais é uma tendência promissora e próxima.

No entanto nos últimos anos, devido às mudanças climáticas globais, o cerrado brasileiro vem sofrendo com o baixo índice pluviométrico e irregularidade de chuvas durante o ano, ocasionando redução da disponibilidade de água para desenvolvimento das espécies da região. O déficit hídrico é um dos principais fatores limitantes do crescimento e desenvolvimento das plantas, fazendo com que a baixa absorção de água reduza o status hídrico das plantas, gerando diversas consequências negativas ao metabolismo, fisiologia e atividade bioquímica das folhas e planta como um todo (REIS et al., 2016; CHIRINO et al., 2017; BARTIERES et al., 2020; BARTIERES et al., 2021).

Com a redução da disponibilidade de água no solo, as características de crescimento das mudas são reduzidas devido à instabilidade do metabolismo da folha e aos danos nos centros de reação do fotossistema II (PS II) (KHATRI e RATHORE, 2019; REIS et al., 2020). Além disso, sob déficit hídrico a maioria das espécies apresenta danos em sua morfologia e metabolismo como o fechamento estomático; a redução da condutância estomática, da fotossíntese e da transpiração; redução do desenvolvimento da área foliar e redução do rendimento e da translocação de fotoassimilados, e esses danos levam ao declínio da taxa de crescimento (SCALON et al., 2011; BARTIERES et al., 2020). Recentemente a busca por técnicas que venham mitigar os danos causados pelo déficit hídrico em espécies arbóreas tem aumentado. Embora o silício não seja considerado um nutriente essencial para as plantas, é

classificado por vários autores como benéfico, pois pode ter um papel importante no metabolismo, atividade fisiológica e otimização da sobrevivência de plantas superiores expostas a diferentes estresses abióticos e bióticos (LIANG et al., 2015). Os efeitos benéficos na utilização do silício em plantas sob estresse hídrico, têm sido observados na literatura e estão relacionados com o aumento da resistência mecânica das células, devido ao depósito de silício na parede celular, proporcionando um melhor ajuste osmótico, redução da transpiração e melhor atividade fotossintética (AHMED et al., 2013; FATIMA et al., 2019).

Neste contexto, além do Si, o sombreamento também vem apresentando efeitos positivos na atenuação do estresse hídrico. Algumas espécies não são adaptadas a ambientes com baixa disponibilidade de água no solo associadas ou não à alterações de luminosidade, assim, alteram gradativamente o seu metabolismo e crescimento para conseguirem sobreviver nessas condições (REIS et al., 2016; CHIRINO et al., 2017; BARTIERES et al., 2020; BARTIERES et al., 2021). Essas alterações na luz podem prejudicar o desenvolvimento das plantas, onde o fotossistema II é afetado pela intensa atividade luminosa (COSTA et al., 2015).

As plantas estão expostas ao estresse hídrico e térmico em vários ecossistemas, nestas condições, o sombreamento pode melhorar a sobrevivência e o crescimento das plantas, pois reduz a temperatura do ar e das folhas, além da transpiração (HOLMGREN et al., 2012; BARTIERES et al., 2020). Para entender as respostas fisiológicas e adaptativas de *D. alata* ao déficit hídrico associado ao silício e diferentes níveis de sombreamento, analisamos a hipótese de que o silício e as diferentes disponibilidades luminosas minimizam os efeitos deletérios do déficit hídrico, ativando o metabolismo fotossintético, fotoquímico e o crescimento das folhas dessa espécie, permitindo ajustes às condições estressantes.

O objetivo deste estudo foi avaliar o potencial do silício e do sombreamento em mitigar os efeitos deletérios do déficit hídrico sobre o metabolismo fotossintético e crescimento da área foliar das mudas *D. alata* e sobre o potencial de recuperação após suspensão das condições de estresse.

4.2. Material e Métodos

Condições gerais

O experimento foi desenvolvido no período de setembro de 2020 a fevereiro de 2021, na Faculdade de Ciências Agrárias, da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), em Dourados – Mato Grosso do Sul (MS). As mudas foram cultivadas em viveiros de 0% (pleno sol), 30% e 70% de sombreamento, os quais foram obtidos utilizando telas de náilon preto, tipo (Sombrite®) e cobertura plástica adicional superior e lateral para proteção contra precipitações.

Os frutos maduros de *D. alata* foram coletados de várias matrizes localizadas em área de Cerrado, na região do assentamento Itamarati (22º 11` 24.731” S 55º 35` 37.370” E), Ponta Porã, MS. Esses frutos foram beneficiados manualmente, e as sementes extraídas foram semeadas em tubetes contendo substrato comercial Bioplant® os quais foram mantidos em casa vegetação sob 30% de sombreamento e recebendo irrigações diárias de 75% da capacidade de retenção de água.

As sementes começaram a emergirem aos 10 dias após a semeadura e aos 90 dias após a emergência, quando as mudas atingiram uma altura média de 20 cm, elas foram transplantadas para vasos plástico com capacidade para 8L, preenchidos com Latossolo Vermelho Distroférrico + areia grossa (3:1, v/v), sendo que cada vaso recebeu 2 mudas. Após o transplante as mudas foram mantidas durante 20 dias sob 30% de sombreamento para aclimatação.

Regimes hídricos, aplicação de Si, Sombreamento e períodos de avaliação

Após a aclimatação as mudas foram separadas em três grupos e foram transferidas para viveiros cobertos com filme e polietileno de baixa densidade sob três níveis de sombreamento: 0% (pleno sol), 30% e 70% de sombreamento. Em cada sombreamento as mudas receberam três regimes hídricos: R1) Irrigação contínua – C: manteve-se 75% da capacidade de retenção de água no substrato por meio do método gravimétrico (SOUZA et al., 2000); R2) Déficit hídrico – E, caracterizado pela suspensão da irrigação e R3) Suspensão da irrigação E + aplicação do Si 0,75 mL Si.

A aplicação do Si foi realizada no período matutino, via pulverização foliar de forma única até o ponto de gotejamento (20 mL por planta), e no mesmo dia realizou-se a suspensão da irrigação das mudas e transferência dos vasos para os viveiros.

O Silício (SiO_2) utilizado foi obtido do produto comercial Agri Sil®. Fertilizante Foliar sendo fonte de silício. O produto possui densidade 2,65 g/cm^{-3}, massa molar 60,08 g/mol, sólido transparente (pó branco).

Para caracterização do metabolismo fotossintético, as mudas foram avaliadas no T0 – tempo zero início do experimento, período antes de iniciar a suspensão da irrigação. Após a suspensão da irrigação, as mudas foram avaliadas em dois períodos:

1) Quando os valores da fotossíntese nas mudas sob suspensão da irrigação chegaram próximos à zero (F0), quando ocorreu a retomada da irrigação;

2) Quando *A* alcançaram valores próximos ao das mudas sob irrigação contínua (REC), caracterizando o período de recuperação;

Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado com os tratamentos arranjados em esquema de parcelas subdivididas, sendo que a combinação dos sombreamentos associado aos regimes hídricos com o silício e sem silício foi alocado nas parcelas, e os dois períodos de avaliações nas subparcelas, com três repetições e duas mudas cada.

Características avaliadas

a) Trocas gasosas: Fotossíntese (*A;* µmol CO_2 m^2 s^{-1}), condutância estomática (*gs*; mol H_2O m^{-2} s^{-1}), concentração interna de CO_2 (C_i; µmol CO_2 m^2 s^{-1}) e a taxa de transpiração nas folhas (*E*; mol H_2O m^{-2} s^{-1}) foram quantificadas utilizando-se o analisador de gás infravermelho - IRGA (ADC, LCi PRO - SD; Analytical Development Co. Ltda, Hoddesdon, UK). A partir desses dados foi calculada a eficiência de carboxilação da Rubisco (A/C_i; µmol CO_2/mmol H_2O) e eficiência do uso da água (*EUA*; µmol CO_2/mmol H_2O). As avaliações foram realizadas no período entre as 8 e 11 horas da manhã, utilizando quatro mudas por tratamento previamente marcadas para serem avaliadas durante todo o período. Foram utilizadas folhas totalmente expandidas localizadas no terço médio das mudas.

b) Índice de clorofila: determinado utilizando medidor portátil de clorofila o clorofilômetro *Soil Plant Analysis Development* (SPAD-502) (Konica-Minolta, Tokyo, Japan). As leituras foram realizadas no período matutino, utilizando as mesmas folhas das leituras de trocas gasosas.

c) Fluorescência da clorofila-*a*: as leituras foram realizadas entre 8 e 11 horas da manhã, submetendo as folhas à condição de escuro por de 30 minutos, utilizando clips adaptadores, para que todos os centros de reação adquirissem a configuração "aberta", indicando a oxidação completa do sistema de transporte de elétrons fotossintético. Após esse período foi mensurada a eficiência quântica potencial fotoquímica do fotossistema II (F_V/F_M), eficiência de conversão de energia absorvida (F_V/F_0) e a produção quântica basal dos processos não fotoquímicos (F_0/F_M) utilizando fluorímetro portátil modelo OS-30p (Opti-Sciences Chlorophyll Fluorometer, Hudson, USA). As mudas utilizadas foram as mesmas das leituras de trocas gasosas e índice de clorofila.

d) Crescimento em área: a área foliar (cm^2) foi determinada com integrador de área foliar LI-COR® (LI 3100, Nebraska – USA).

e) Conteúdo relativo de água das folhas (CRA; %): o CRA foi determinado de acordo com a metodologia de Slavick (1979).

Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e quando significativo (teste F, $p < 0,05$), as médias em função dos regimes hídricos e sombreamento e a interação com os períodos de avaliação foram submetidas aos testes de Scott-Knott ($p < 0.05$) e as médias dos períodos de avaliação pelo teste F ($p < 0,05$), utilizando o programa estatístico SISVAR 5.3 (FERREIRA, 2019).

4.3. Resultados

Observa-se que sob restrição hídrica (E), as mudas de *D. alata* sem Si cultivadas em ambientes de pleno sol 0, 30 e 70% de sombra atingiram F0 (0,58, 0,52 e 0,55 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}) aos 21, 28 e 31 dias, respectivamente. Enquanto aquelas com 0,75 mL Si apresentaram valores de F0 somente aos 24, 30 e 33 dias de restrição hídrica, com média (0,66, 0,64 e 0,66 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}), respectivamente (Tab. 1).

Tabela 1. Atividade da fotossíntese (*A*) em mudas de *D. alata* cultivadas em função das condições de irrigação continua (IC) e intermitente (II) combinada sem e com 0,75 de Si, sombreamento (0, 30 e 70%) em diferentes períodos de avaliação (T0: tempo zero; F0: fotossíntese próximo a zero; REC: recuperação das plantas).

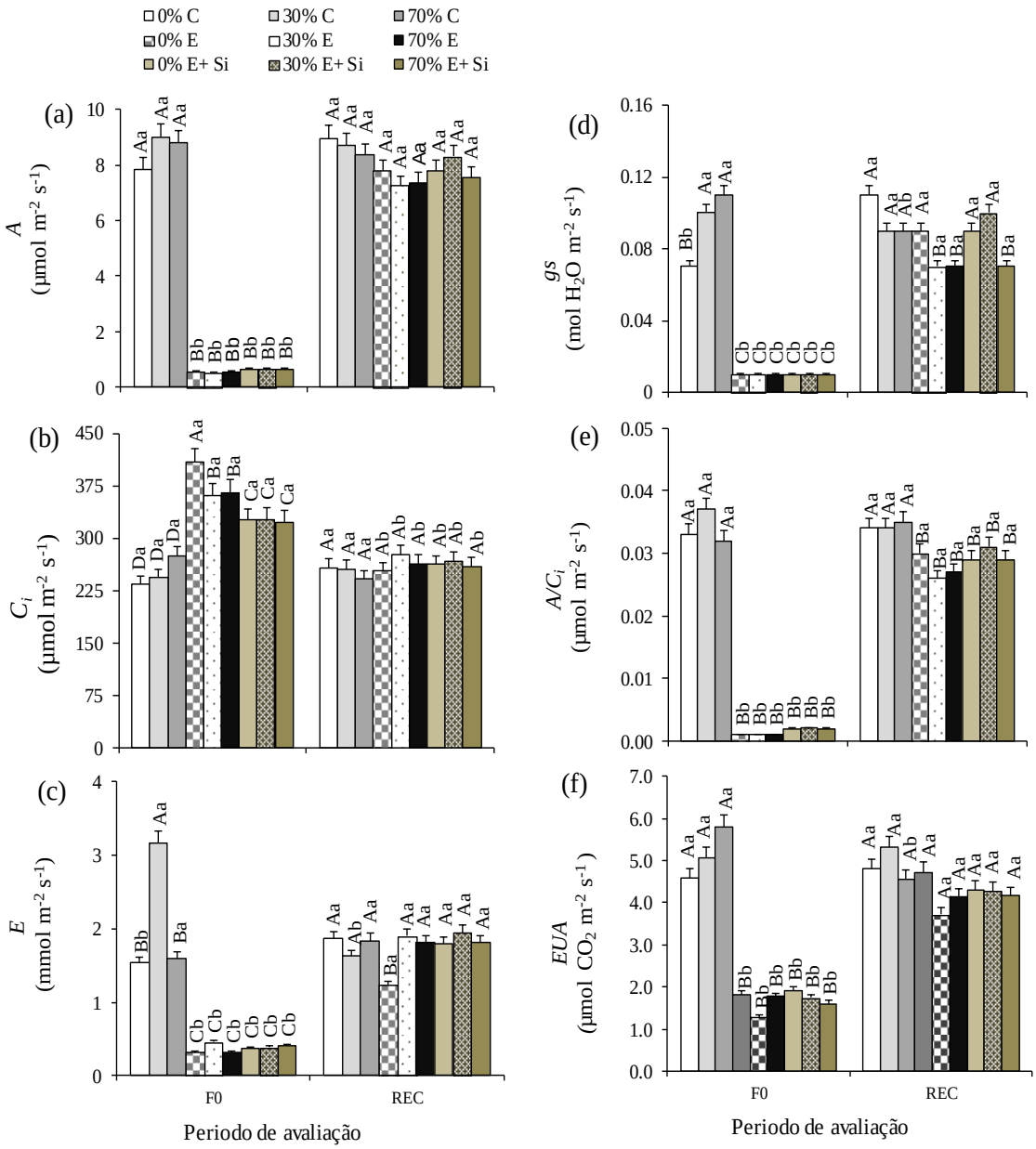
Tratamentos	Datas de avaliação				
	11/01/2021	01/02/2021	04/02/2021	09/02/2021	11/02/2021
	T0	F0	F0	REC	REC
0% C	8,20	7,86	8,16	8,96	-
0% E	8,20	0,58	3,55	7,80	-
0% E+Si	8,20	3,08	0,66	4,34	7,80
	11/01/2021	08/02/2021	10/02/2021	15/02/2021	16/02/2021
30% C	8,20	9,01	8,78	8,70	-
30% E	8,20	0,52	3,12	7,25	-
30% E+Si	8,20	2,38	0,64	6,18	8,30
	11/01/2021	11/02/2021	13/02/2021	20/02/2021	-
70% C	8,20	8,82	8,55	8,36	-
70% E	8,20	0,55	2,89	7,35	-
70% E+Si	8,20	2,24	0,66	7,57	-

0%: pleno sol; 30% sombreamento e 70% de sombreamento; C: irrigação continua, E: irrigação intermitente e E+Si: irrigação intermitente com 0,75 mL de Si.

Ao término de cada avaliação todas as mudas dos respectivos tratamentos estressados recuperaram os valores *A*, onde as mudas cultivadas sob o ambiente de 0, 30 e 70% de sombra sem Si levaram 8, 8 e 9 dias respectivamente para recuperarem seu metabolismo fotossintético após a retomada da irrigação (30, 36 e 41º dia de experimento). As mudas tratadas com Si em pleno sol (0%), 30 e 70% de sombra, levaram 7, 6 e 7 para recuperação após a retomada da irrigação (31, 37 e 41º dias de experimento), assim, todos recuperaram a *A* com valores semelhantes ao das mudas controle (tabela 1).

É possível verificar que as mudas de *D. alata* cultivadas sob condições de suspensão hídrica em diferentes ambientes de sombreamento, apresentaram redução

significativa na Fotossíntese (*A*), independente da utilização do Si, onde as mudas estressadas sem Si nos ambientes de pleno sol (0%), 30 e 70% de sombra apresentaram valores médios para (*A*) de 0,55 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1} enquanto as cultivadas com Si em nos mesmos ambientes foi de 0,65 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1} na F0 (Figura 2A), não diferindo das mudas sob déficit sem Si nesse mesmo período. Constatamos que as mudas de todas as condições de cultivo avaliadas recuperaram a *A* (REC) após a retomada da irrigação.



Letras maiúsculas comparam os regimes hídricos dentro cada período de avaliação (Scott-Knott; $p < 0.05$).

Letras minúsculas comparam os períodos avaliação dentro de cada regime hídrico (F; $p < 0.05$).

Figura 1. Fotossintética – *A* (a), concentração intracelular de CO_2 – C_i (b), transpiração – *E* (c), condutância estomática – *gs* (d), eficiência intrínseca de carboxilação da

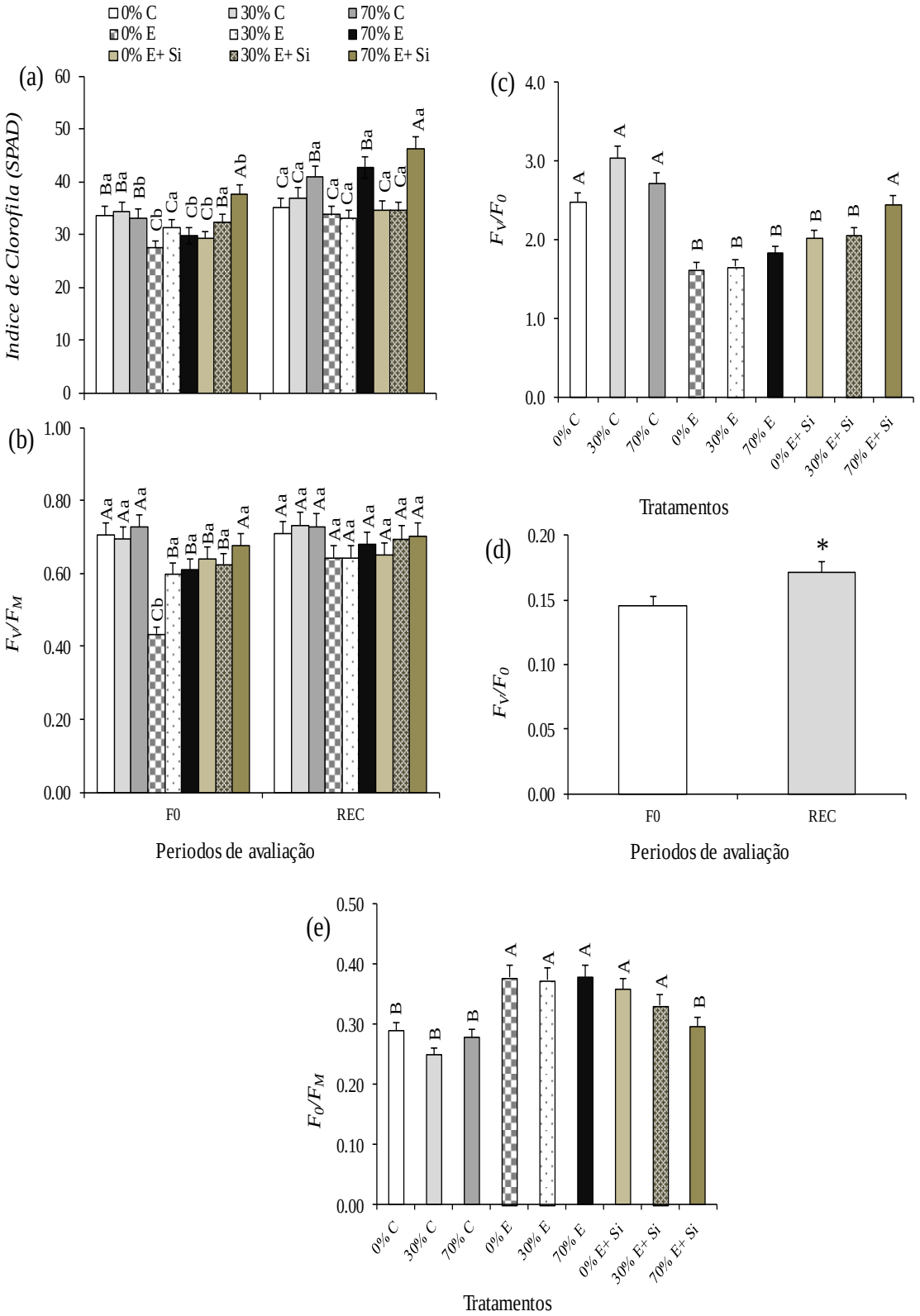
Rubisco A/C_i (e) e eficiência do uso da água – *EUA* (f) em mudas de *D. alata* produzidas sob diferentes regimes hídricos (C: Irrigada; E: suspensão da irrigação combinada sem e com 0,75 de Si) em diferentes períodos de avaliação (F0: fotossíntese próximo a zero; REC: recuperação das plantas).

Observamos maior concentração intracelular de CO_2 (C_i) (408,00 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}) e menor eficiência de carboxilação da Rubisco (A/C_i) (média de 0,0015 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}) nas mudas cultivadas sob déficit hídrico sem Si, sendo que a A/Ci não variou significativamente das mudas com a presença de Si durante a F0 em nenhuma das condições de sombreamento. Na REC todas as mudas apresentaram valor de C_i semelhante, sugerindo recuperação daquelas previamente estressadas, enquanto a A/C_i das mudas previamente estressadas nos diferentes ambientes de sombreamento, independentes da presença do Si aumentaram após a retomada da irrigação, mas não recuperaram os valores (Figura 2B e 2E).

Os menores valores para transpiração (*E*) e condutância estomática (*gs*) foram observados sob suspensão hídrica, independente da presença do Si durante a (F0) em todas as condições de sombreamento avaliadas (Figura 2C e 2D). Na REC, após a retomada da irrigação os valores de transpiração se recuperaram, exceto para as mudas estressadas cultivadas em pleno sol. A condutância estomática aumentou em todos os tratamentos após a retomada da irrigação (REC), alcançando valores semelhantes ao das mudas controle, exceto as estressadas cultivadas a 30 e 70% de sombra e as estressados sem Si a 70% de sombra.

A eficiência no uso da água (*EUA*) das mudas cultivadas sob estresse hídrico sem e com Si em todos os sombreamentos avaliados durante a (F0) foi significativamente menor com média de 1,62 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1} para as estressadas sem Si e 1,75 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1} para as cultivadas com Si nas mesmas condições (Figura 2F). Após a retomada da irrigação as mudas de todos os tratamentos recuperaram (REC) os valores de EUA, alcançando valores similares ao das mudas do controle.

O índice de clorofila foi maior nas mudas cultivadas no ambiente de 70% de sombra sob condição de estresse com Si na F0 e foi menor nas demais mudas sob déficit hídrico (Figura 3A). Após a retomada da irrigação (REC) o índice de clorofila aumentou nas mudas previamente estressadas e cultivadas sob 0 e 70% de sombreamento alcançando valores semelhantes ao das mudas controle, sugerindo a recuperação desse pigmento. Porém, as mudas sob 70% de sombreamento em todas as condições de cultivo os valores do índice de clorofila se mantiveram mais elevados.



Letras maiúsculas comparam os regimes hídricos dentro cada período de avaliação (Scott-Knott; $p < 0.05$).

Letras minúsculas comparam os períodos avaliação dentro de cada regime hídrico (F; $p < 0.05$).

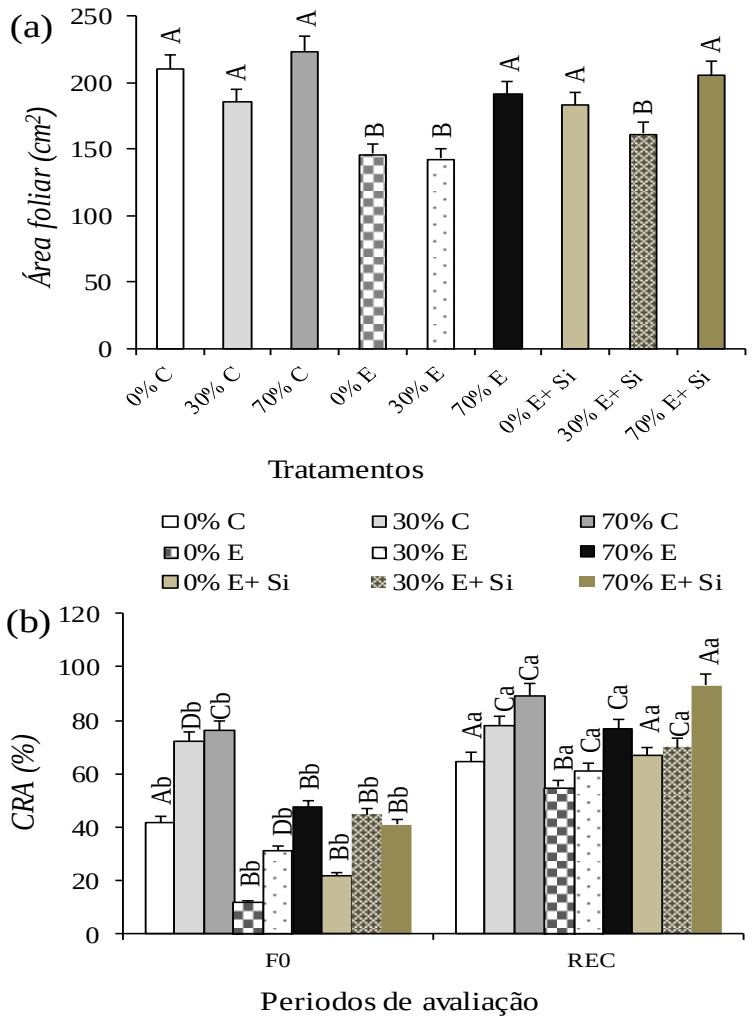
Figura 2. Índice de clorofila SPAD (a) Eficiência quântica potencial do fotossistema II - F_V/F_M (b), eficiência de conversão de energia absorvida - F_V/F_0 (c e d) e produção quântica basal dos processos não fotoquímicos - F_0/F_M (e) em mudas de *D. alata* produzidas sob diferentes regimes hídricos (C: Irrigada; E: suspensão da irrigação combinada sem e com 0,75 de Si) em diferentes períodos de avaliação (F0: fotossíntese próximo a zero; REC: recuperação das plantas).

As mudas estressadas apresentaram menor eficiência quântica potencial no fotossistema II (F_V/F_M) na F0, sendo que as mudas sem Si produzidas sob condições de pleno sol (0%) apresentaram significativamente o menor valor (0,433). Entretanto, a aplicação de Si e o cultivo sob 70% promoveram maiores valores que não variou das mudas controle (Figura 3B). Na REC as mudas de todos os tratamentos apresentaram valores semelhantes, mostrando que houve recuperação dessa característica após a retomada da irrigação.

Os maiores valores de eficiência de conversão de energia absorvida (F_V/F_0) foram observados nas mudas controle cultivadas sob irrigação continua em todos os níveis de sombreamento avaliados com média de 2,75 e nas mudas estressadas com Si a 70% de sombreamento com valor (2,44) cujos valores não variaram entre si (Figura 3C). Sob estresse nos demais níveis de sombreamento a presença do silício não contribuiu para manter elevado o F_V/F_0. Durante o período de estresse na F0, o valor de F_V/F_0 foi menor com média (0,145), após a retomada da irrigação as mudas recuperaram (REC) o valor de F_V/F_0, atingindo média significativamente maior (0,171) (Figura 3D).

Para a produção quântica basal dos processos não fotoquímicos (F_0/F_M) os maiores valores foram observados nas mudas cultivadas sob déficit hídrico sem Si em todos os níveis de sombreamentos avaliados e nas mudas estressadas com Si a pleno sol (0%) e 30% de sombreamento. Entretanto, as mudas tratadas com Si produzidas em ambiente de 70% de sombreamento tiveram menores valores e semelhantes ao das mudas controle (Figura 3E). Não houve efeito do período de avaliação para F_0/F_M.

A área foliar foi menor nas mudas estressadas sem Si e cultivada nos ambientes de pleno sol 0 e 30% de sombreamento e com Si a 30% de sombreamento. Para as mudas dos demais tratamentos a área foliar não variou independente do regime hídrico (Figura 4A). Sob estresse hídrico, o sombreamento de 70% e a presença de silício favoreceram a expansão da área foliar.



Letras maiúsculas comparam os regimes hídricos dentro cada período de avaliação (Scott-Knott; $p < 0.05$).

Letras minúsculas comparam os períodos avaliação dentro de cada regime hídrico (F; $p < 0.05$).

Figura 3. Área foliar (a) e conteúdo relativo de água das folhas CRA (b) em mudas de *D. alata* produzidas sob diferentes regimes hídricos (C: Irrigada; E: suspensão da irrigação combinada sem e com 0,75 de Si) em diferentes períodos de avaliação (F0: fotossíntese próxima à zero; REC: recuperação das plantas).

Quanto ao CRA, às mudas sob déficit hídrico sem e com Si tiveram menores valores principalmente as produzidas sob condições de pleno sol (0%) com valores de (11,94 e 21,80%) enquanto que aquelas tratadas com Si a 30 e 70% de sombra e sem Si a 70% de sombra não diferiram do controle produzidas a pleno sol (0%) (Figura 4B). Na REC os valores de CRA aumentaram para todos os tratamentos, entretanto as mudas produzidas com Si a 70% de sombra atingiram maior valor (92,99%) de CRA, valor que não diferiu das mudas controle cultivadas a 70% de sombra.

4.4. Discussão

A interação sombreamento e silício não foram eficientes em mitigar os efeitos estressantes do déficit hídrico nas mudas de *D. alata* durante o período de restrição hídrica, embora tenham atuado retardando a redução da fotossíntese e a chegada do nível fotossintético próximo a zero e antecipado a recuperação dessa característica. Novos estudos deveriam ser conduzidos a fim de investigar o mecanismo de ação do silício nessa espécie, realizando mais aplicações durante o período de estresse imposto as mudas de *D. alata*. O efeito mais pronunciado foi do sombreamento, especialmente de 70% em que foi verificado a menor redução do conteúdo relativo de água nas folhas das mudas e a manutenção da expansão da área foliar sob restrição hídrica. Entretanto, independente das condições de cultivo durante a restrição hídrica, todas as mudas se recuperaram e algumas até superaram as mudas controle em algumas características, exceto na eficiência de carboxilação da Rubisco, que não se recuperou no período avaliado. Nossos resultados sugerem que *D.alata* embora sensível ao déficit hídrico, ela apresenta plasticidade e se ajusta ao estresse e se recupera após o fornecimento normal de água.

A redução mais rápida da fotossíntese (*A)* das mudas estressadas cultivadas em pleno sol comparadas às mudas sombreadas também foi observada por Silverio et al. (2021) em mudas de *Campomanesia xantocarpa* O. Berg. e os autores sugerem que em ambiente de pleno sol, há exposição direta das plantas a altas temperaturas o que causa perda de água pela transpiração foliar e desfolha, pois, há maior evaporação da água do substrato, possivelmente causando uma condição de déficit hídrico. As condições climáticas durante o período de 11/01 a 21/01 caracterizava-se por grande intensidade de chuva, fazendo com que as avaliações de monitoramento da fotossíntese *A* fossem realizadas somente 11 dias após esse período, o que pode ter favorecido a manutenção de alta umidade relativa do ar e retardado o efeito do déficit hídrico no solo nas mudas sob suspensão da irrigação.

Consideramos que a associação do Si com o sombreamento na produção de mudas de *D. alata* sob déficit hídrico foi positiva uma vez que possibilitou que as mudas dessa espécie mantivessem a *A* mais elevada por um maior período, estabelecendo a manutenção do aparato fotossintético e da turgência das plantas quando cultivadas nessa situação.

Assim acreditamos que o sombreamento apresentou resultados positivos na mitigação do déficit hídrico em plantas de *D. alata*, ao retardar a redução do

metabolismo fotossintético. Resultado semelhante foi observado na literatura em mudas de *C. xantocarpa* (BARTIERES et al., 2020 e 2021), para as quais o sombreamento permitiu uma menor perda de água pelo substrato, refletindo na abertura dos estômatos por mais tempo, e favorecendo maior assimilação de CO_2, nas mesmas condições de cultivo observadas para *D. alata*.

Observamos que o déficit hídrico ocasionou vários efeitos deletérios no metabolismo fotossintético das mudas *D. alata* nos diferentes ambientes de cultivo, tornando-as sensíveis ao estresse, fazendo com que houvesse diminuição da condutância estomática (g_s), afetando negativamente as trocas gasosas pelo aumento da C_i, redução da condutância estomática, da taxa transpiratória, da eficiência de carboxilação da Rubisco e de uso da água.

Em geral, a redução da fotossíntese possivelmente está atribuída a reduções da eficiência de carboxilação da Rubisco e da condutância estomática, mecanismo esse que reduz a transpiração e diminui a entrada de CO_2 no mesofilo, interrompendo gradualmente os processos fisiológicos de plantas sob estresse hídrico (SCALON et al., 2020). Esse comportamento nas plantas, afeta o potencial hídrico das folhas, as trocas gasosas, a eficiência de captura, transferência e conversão de energia por fotossistemas, mecanismos e processos fisiológicos relacionados ao crescimento (ROSA et al., 2017; NUNES et al., 2017; FRANÇA et al., 2017).

As mudas cultivadas sem e com Si, sob condições de 30 e 70% de sombra devem ter apresentado menor perda de água por evaporação pelo substrato em relação aos demais tratamentos em pleno sol, o que foi caracterizada pelo maior CRA nas folhas durante a F0 nas mudas estressadas. Essas respostas favoreceram a absorção de água pelas plantas, entretanto, não foram suficientes para evitar danos aos processos fisiológicos, ocorrendo pouca contribuição na manutenção do aparato fotossintético das mudas de *D. alata* durante o período de estresse (F0).

Ressaltamos, entretanto que, apesar do déficit hídrico, após a retomada da irrigação as mudas, a maioria das características avaliadas nos ambientes de 0, 30 e 70% de sombra independente da presença do silício, atingiram valores próximos aos das mudas controle, mostrando que o dano não foi irreversível.

Apesar de relatos sobre a importância do Si em mitigar o déficit hídrico em plantas sob condições de seca serem observados na literatura, sugerindo que ele mantém a integridade e metabolismo fisiológico por mais tempo, eles relacionam a dependência da intensidade do estresse e da dose do silício. Os estudos da literatura sugerem que o

silício está envolvido tanto na dinâmica estomática quanto nas reações fotoquímicas e, portanto, seus efeitos benéficos em plantas sob estresse hídrico podem ser parcialmente atribuídos ao seu impacto positivo no status hídrico da planta e na fotossíntese (ZHU e GONG, 2014). Entretanto, esses efeitos benéficos do silício ainda podem ser questionados quanto aos resultados observados nas mudas de *D. alata,* o que pode ser atribuído à dose e a fonte de si utilizada no trabalho.

Verificamos efeitos benéficos do silício, promovendo a manutenção das trocas gasosas (assimilação de CO_2 e taxas de transpiração) (TEIXEIRA et al., 2020) e condutância estomática e carboxilação da Rubisco sob condições de seca (GONG e CHEN, 2012), em diferentes espécies como *Saccharum spp*. (TEIXEIRA et al., 2020), *Brassica napus L. (H*ASANUZZAMAN et al., 2018), *Lactuca sativa L*. (FÁTIMA et al., 2019), indicando que o silício pode agir na melhoria do status hídrico das plantas (ETESAMI e JEONG, 2018).

As respostas das mudas *D. alata* durante a F0, submetida ao sombreamento e efeito do silício podem ser explicadas devido à espécie não ser acumuladora de Si. Acreditamos que uma maior investigação da função do silício em plantas com baixo acúmulo de Si, possa ajudar a esclarecer o mecanismo bioquímico para a tolerância à seca mediada pelo Si (ZANG et al., 2018).

Ressaltamos que, mesmo que o Si tenha pouco contribuindo na F0, o mesmo contribuiu positivamente na menor *Ci* nos diferentes níveis de sombreamento, embora não alterando significativamente a relação A/Ci nesse período, porém fazendo com que ela tenha sido maior na REC.

O índice de clorofila (SPAD) nas mudas de *D. alata* cultivadas sob déficit hídrico e submetidas a diferentes níveis de sombreamento foram relativamente menores em relação aos das mudas controle nesse mesmo período, contribuindo para gerar dano ao aparelho fotossintético. A redução do índice de clorofila nas plantas sob déficit hídrico pode ser ocasionada pela menor assimilação de nitrogênio, que é importante na síntese de clorofila (LINNÉ et al., 2021).

Ressaltamos que o menor índice de clorofila também pode ser atribuído aos danos oxidativos, o que reduz a fotossíntese (ASHARAF e HARRIS, 2013). Assim, o menor índice de clorofila nas folhas sob pleno sol pode ser explicado pela sensibilidade da clorofila à foto-oxidação, indicando que esta condição causa danos aos cloroplastos (SILVERIO et al., 2020). O aumento que observamos no teor de clorofila nas mudas cultivadas com Si sob condição de 70% de sombreamento, durante a fase de estresse e

período de recuperação, possivelmente está relacionada à baixa intensidade luminosa nesse ambiente de cultivo (MOTA et al., 2012), levando à necessidade de compensação do balanço energético (SILVERIO et al., 2020). Esse aumento do teor de clorofila mediado pelo silício sob déficit hídrico também pode estar associado à melhoria da defesa antioxidante e diminuição do dano oxidativo (SHI et al., 2016).

A menor eficiência quântica fotoquímica do PS II (F_V/F_M) nas mudas estressadas na (F0) em diferentes níveis de sombreamento, principalmente em condições de pleno sol sem Si e o aumento significativo nas mudas cultivada com Si sob 70% de sombra, indica melhoria na eficiência fotoquímica. A menor F_V/F_M observada em mudas de *D. alata* sob estresse sem Si pode estar relacionada à redução do teor de clorofila, fazendo com que ocorra diminuição na eficiência do PS II (SONG et al., 2014).

De maneira semelhante mudas de *Calophyllum brasiliense* (REIS et al., 2020), também apresentaram redução de F_V/F_M em condições de déficit hídrico e maiores incidência luminosa. Em outros trabalhos, as mudas de *Solanum lycopersicum* cultivadas com Si em condição de estresse hídrico (ZANG et al., 2018) e as mudas de *C. xantocarpa* cultivadas sob estresse e submetida aos níveis de 30 e 70% de sombra também apresentaram resultados semelhantes (BARTIERES et al., 2021). Assim a literatura sugere que mais centros de reação do PS II foram abertos em plantas com aplicação de silício, o que pode permitir que mais energia de excitação fosse usada para transporte de elétrons sob seca (ZHU et al., 2016).

A eficiência de conversão de energia absorvida (F_V/F_0) das mudas de *D. alata* foi reduzida enquanto a produção quântica basal dos processos não fotoquímicos *(*F_0/F_M) aumentou significativamente sob suspensão hídrica, cultivadas com e sem Si nas diferentes disponibilidades de luz, sendo um indicativo de estresse. Portanto, a redução da (F_V/F_0*)* e o aumento da F_0/F_M prejudicam as funções fotoquímica do PS II, fazendo com que sejam inibidas em decorrência da falta de água, ocasionando interferência no transporte de nutrientes e absorção de luz pela planta. Isto ocorre porque as funções fotoquímicas refletem em redução na eficiência das plantas para capturar, transferir e converter energia (NESTERENKO et al., 2019) e de preservar a integridade ou causar dano fotoinibitório nos centros de reação de PS II devido a algum fator de estresse (REIS et al. 2020). Resultados similares foram observados para redução e aumento dessas funções em *C. xantocarpa (*BARTIERES et al., 2021*)* e em *Cedrela odorata L.* (SILVA et al., 2021*)* sob déficit hídrico.

É importante salientar que as mudas tratadas com Si a 70% de sombreamento apresentaram efeito mitigador sobre as características de fotoquímicas da fotossíntese, resultando na manutenção de F_V/F_0 e F_0/F_M não prejudicando as atividades fotoquímicas. De acordo com Zang et al. (2018), as plantas de *S. lycopersicum* sob condições de déficit hídrico e tratadas com Si, melhoraram sua capacidade de converter a energia do fóton em energia química, sugerindo que a adição de silício pode diminuir danos causados pela seca ao PS II, e assim manter a produção de matéria seca sob déficit hídrico.

Os menores valores de área foliar das mudas sob déficit hídrico cultivadas sob pleno sol e 30% de sombreamento sem Si ou sob 30% de sombra com Si, sugere que a maior disponibilidade de luz se torna prejudicial para a realização das funções metabólicas e fisiológicas das plantas sob déficit hídrico, fazendo com que a absorção e translocação de água sejam reduzidas, através do fechamento estomático. Sob estresse hídrico o fechamento estomático pode ocorrer de imediato o que minimiza a desidratação e danos às folhas (JACKSON et al., 2009; LINNÉ et al., 2021). Silva et al., (2021), afirmam que a diminuição da AF em mudas sob estresse hídrico é uma resposta favorável e pode reduzir a perca de água por transpiração e de turgidez.

Ressaltamos que a maior AF nas mudas sob déficit hídrico e com menor disponibilidade luminosa (70% de sombreamento) independente da presença do Si, corrobora informações da literatura para outras espécies e sugerem que, sob sombreamento ocorre menor temperatura foliar e menor taxa transpiratória, possibilitando a alocação de carbono para expandir a superfície foliar (GONÇALVES et al., 2012; GABURRO et al., 2015),. Além disso, as plantas com baixa disponibilidade de luz tendem a investir mais fotoassimilados na parte aérea (FELSEMBURGH et al., 2016), fazendo com que ocorra mais área para absorção dos raios luminosos e com isso um maior crescimento das plantas em condições de sombra. Assim, o efeito do déficit hídrico sobre a área foliar foi mitigado mais pelo sombreamento de 70% do que pela presença de silício, uma vez que AF não variou significativamente entre as mudas sob 70% de sombreamento independente da presença ou ausência do silício.

O CRA nas mudas de *D. alata* sob déficit hídrico foi menor quando submetidas ao estresse com e sem Si em pleno sol. A alta temperatura possibilita que as plantas percam maior quantidade de água para o ambiente, através da transpiração e evaporação, fazendo com que ocorra redução do crescimento foliar e consequentemente perda da turgidez, afetando negativamente a produção de fotoassimilados. Contudo, as

plantas cultivadas em ambiente protegido e sob sombreamento, independente da presença do Si, conseguiram manter maior o CRA sob déficit hídrico. Durante a REC a interação do Si com o maior nível de sombra, contribuíram para elevar e superar o CRA das folhas quando comparado ao das mudas controle o que certamente favoreceu na estabilização dos processos metabólicos e crescimento das mudas.

Em ambiente de 0% de sombreamento, há uma maior exposição das plantas a elevadas temperaturas, causando perda de água pela transpiração foliar e desfolha, pois há maior evaporação da água do substrato, possivelmente causando uma condição déficit hídrico (SILVERIO et al., 2021). Na literatura foi observada redução do CRA em mudas sob déficit hídrico, como por exemplo, mudas de *C. xantocarpa* (BARTIERES et al., 2020) e em *C. odorata* (SILVA et al., 2021). Enquanto os maiores níveis de sombreamentos contribuíram de forma positiva na manutenção do CRA nas mudas de *D. alata*, o mesmo foi observado para *C. xantocarpa* (BARTIERES et al., 2020), concluindo que a manutenção de alto CRA nas folhas evidencia o efeito mitigador do sombreamento sobre o déficit hídrico.

4.5. Conclusões

A interação sombreamento e silício não mitigaram o efeito estressante do déficit hídrico durante a restrição hídrica em mudas de *D. alata*, entretanto, retardaram a redução da fotossíntese e anteciparam sua recuperação.

Durante o déficit hídrico o sombreamento de 70% independente do silício, manteve o índice SPAD e as características de fluorescência da clorofila *a* com valores semelhantes ou superiores e com menor redução do conteúdo relativo de água das folhas.

Todas as características avaliadas se recuperaram após a retomada da irrigação no período avaliado, exceto a A/Ci, independente dos tratamentos.

4.6. Referências

AHMED, M.; KAMRAN, A.; ASIF, M.; QADEER, U.; AHMED, Z. I.; GOYAL A. Silicon priming: a potential source to impart abiotic stress tolerance in wheat: a review. **Australian Journal Crop Science**, v. 7, n. 4, p. 484-491, 2013.

ASHARAF M.; HARRIS, P. J. C. hotosynthesis under stressful environments: an overview. **Photosynthetica**, v. 51, p. 163-190, 2013.

BARTIERES, E. M. M; SCALON, S. P. Q; DRESCH, D. M.; CARDOSO, E. A. S.; JESUS, M. V.; PEREIRA, Z. V. Shading as a means of mitigating water deficit in seedlings of *Campomanesia xanthocarpa* (Mart.) O. Berg. **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici**, v. 48, n. 1, p. 234-244, 2020.

BARTIERES, E. M. M.; DRESCH, D. M.; REIS, L. C.; PEREIRA, Z. V.; MUSSURYA, R. M.; SCALON, S. P. Q. Shading minimizes the effects of water deficit in *Campomanesia xanthocarpa* (Mart.) O. Berg seedlings. **Brazilian Journal of Biology,** v. 83, p. e244718, 2021.

CÂNDIDO, J. B.; LIMA, D. P.; TEIXEIRA, P. R.; SOUZA, P. B. Floristic of estrato the woody of a cerrado área sensu stricto, Gurupi, Tocantins. **Enciclopédia Biosfera**, v. 13, n. 24, p. 17-45, 2016.

CHIRINO, E; RUIZ-YANETTI, S.; VILAGROSA, A.; MERA, X.; ESPINOZA, M.; LOZANO, P. Morpho-functional traits and plant response to drought conditions in seedlings of six native species of Ecuadorian Ecosystems. **Flora**, v. 233, p. 58-67, 2017.

COSTA, A. C.; REZENDE-SILVA, S. L.; MEGGUER, C. A.; MOURA, L.M. F.; ROSA M, SILVA, A. A. The effect of irradiance and water restriction on photosynthesis in young jatobá-do-cerrado (*Hymenaea stigonocarpa*) plants. **Photosynthetica**, v. 53, n. 1, p. 118-127, 2015.

ETESAMI, H.; JEONG, B. R. Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. **Ecotoxicology Environmental Safety**, v. 147, n. 1, p. 881-896, 2018.

FATIMA, R. T.; JESUS, E. G.; GUERRERO, A. C.; ROCHA, J. L. A.; BRITO, M. E. B. Silicon fertilization as atenuant of water stress in *lettuce* growth and gas exchanges. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 27, n. 2, p. 170-179, 2019.

FRANÇA, P. H. T.; SILVA, E. C. A.; SILVA, T. C.; BRASIL, N. A.; NOGUEIRA, R. J. M. C. Physiological analysis in seedlings of guanandi (*Calophyllum brasiliense* Cambess.) under a water deficit. Agropecuária Científica no Semiárido, v. 13, n.4, p. 264-269, 2017.

FREITAS, V. M. B.; SCALON, S. P. Q.; DRESCH, D. M.; BASTOS, S. S.; SOUZA, A. P. R. Influence of exogenous application of abscisic acid in gas exchanges of *Hymenaea Courbaril* L. (Fabaceae) seedlings subjected to water deficit. **Floresta**, v. 48, n. 2, p. 163-172, 2018.

GONG, H.; CHEN, K. The regulatory role of silicon on water relations, photosynthetic gas exchange, and carboxylation activities of wheat leaves in field drought conditions. **Acta Physiologiaea Plantarum**, v. 34, n. 4, p. 1589-1594, 2012.

HASANUZZAMAN, M.; NAHAR, K.; ANEE, T. I.; KHAN, M. I. R.; FUJITA, M. Silicon-mediated relation of antioxidant defense and glyoxalase systems confers drought stress toleranc in *Brassica napus* L. **South African Journal Botany**, v. 115, p. 50-57, 2018.

HOLMGREN, M.; GOMEZ-APARICIO, L.; QUERO, J. L.; VALLADARES, F. Non-linear effects of drought under shade: reconciling physiological and ecological models in plant communities. **Physiological ecology**, v. 169, n. 2, p. 293-305, 2012.

JACKSON, M. B.; ISHIZAWA, K.; ITO, O. Evolution and mechanisms of plant tolerance to fooding stress. **Annals of Botany**, v. 103, n.2, p.137–142, 2009.

KHATRI, K.; RATHORE, M. S. Photosystem photochemistry, prompt and delayed fluorescence, photosynthetic responses and electron flow in tobacco under drought and salt stress. **Photosynthetica**, v. 57, v. 1, p. 61- 74, 2019.

LINNÉ, J. A.; JESUS, M. V.; LIMA, V. T.; REIS, L. C.; DRESCH, D. M.; SCALON S. P. Q.; SANTOS, C. C. Efects of shading on growth and photosynthetic metabolism in *Dipteryx alata Vogel* seedlings under fooding. **Brazilian Journal Botany**, v. 44, n. 3, p. 629–638, 2021.

MOTA, L. H. S.; SCALON, S. P. Q.; HEIZ, R. Shading in emergency of seedlings and on the initial growth of *Dipteryx alata* Vog. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 3, p. 423-431, 2012.

NESTERENKO, T. V.; SHIKHOV, V. N.; TIKHOMIROV, A. A. Estimation of changes in the activity of photosynthetic apparatus of plant leaves based on half-time of fluorescence intensity decrease. P**hotosynthetica**, v. 57, n. 1, p. 132-136, 2019.

NUNES D. P.; SCALON S. P. Q.; DRESCH D. M.; GORDIN C. R. B. Photosynthetic and enzymatic metabolism of *Schinus terebinthifolius* Raddi seedlings under water deficit. **Ciência Agrotecnologia**, v. 41, n. 6, p. 676-682, 2017.

REIS, S. M.; MARIMON-JUNIOR, B. H.; MORANDI, P. S.; SANTOS, C. O.; OLIVEIRA, B, MARIMON, B. S. Initial development and quality of saplings of *Copaifera langsdorffii* Desf. under different levels of shading. **Ciência Florestal**, v. 26, n.1, p. 11-20, 2016.

REIS, L. C.; SCALON, S. P. Q.; DRESCH, D. M.; FORESTI, A. C.; SANTOS, C. C.; PEREIRA, Z. V. Chlorophyll a fluorescence as an indicator of water stress in *Calophyllum brasiliense*. **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici**, v. 48, n.1, p. 210-220, 2020.

ROSA, D. B. C. J.; SCALON, S. P. Q.; CREMON, T.; CECCON, F.; DRESCH, D. M. Gas exchange and antioxidant activity in seedlings of *Copaifera langsdorffii* Desf.

Under different water conditions. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 89, n. 4, p. 3039-3050, 2017.

SANO, S. M.; BRITO, M. A.; RIBEIRO, J. F. *Dipteryx alata*: Baru. In: VIEIRA R. F, CAMILLO, J.; CORADIN, L. (eds). **Espécies nativas da fora brasileira de valor econômico atual ou potencial: plantas para o futuro: Região Centro-Oeste**. Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, Brasília, 2016, 203-215 p.

SARAH, M. S.; OLIVEIRA FILHO, A. S. B.; PRADO, R. M.; PALARETTI, L. F. Silicon to mitigate stress due to manganese deficiency and water deficit in pre-sprouted sugarcane seedlings. **Revista Científica**, v. 48, n. 2, p. 170-187, 2020.

SCALON, S. P. Q.; MUSSURY, R. M.; EUZÉBIO, V. L. M.; KODAMA, F. M.; KISSMANN, C. Water stress in metabolism and initial growth of mutambo (*Guazuma ulmifolia* Lam). **Ciência Florestal**, v. 21, n. 4, p. 655-662, 2011.

SCALON, S. P. Q.; MITSUKO, F.; DRESCH, D. M.; PEREIRA, Z. V.; MUSSURY, R. M.; SCALON, L. Q. Gas Exchange in *Caryocar Brasiliense* Cambess Seedlings in Water Deficit Conditions. **Floresta Ambiente**, v. 27, n. 2, p. 1-8, 2020.

SHI, Y. I.; ZHANG, Y.; HAN, W. H.; FENG, R.; HU, Y. H.; GUO, J.; GONG, H. J. Silicon enhances water stress tolerance by improving root hydraulic conductance in *Solanum lycopersicum* L. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, n. 196, p. 1-15, 2016.

SILVA, M. S.; SCALON, S. P. Q.; SILVERIO, J. M.; SANTOS, J. K. V.; SANTOS, C. C.; DRESCH, D. M. Do hydro-retainer polymers attenuate damage from water fluctuations in leaf metabolism and the quality of *Cedrela odorata* seedlings? **International Journal of Agriculture e Biology**, v. 26, n. 2, p. 209–216, 2021.

SILVERIO, J. M.; ESPÍNDOLA, G. M.; SANTOS, C. C.; SCALON, S. P. Q.; VIEIRA, M. C. Phosphate fertilization and shading on the initial growth and photochemical efficiency of *Campomanesia xanthocarpa* O. Berg. **Floresta**, v. 50, n. 4, p. 1741-1750, 2020.

SONG, A.; LI, P.; FAN, F.; LI, Z.; LIANG, Y. The effect of silicon on photosynthesis and expression of its relevant genes in rice *Oryza sativa* L. under high-zinc stress. **Plos One**, v. 9, n. 11, e113782, 2014.

TEIXEIRA, G. C. M.; ROCHA, M. A. S.; OLIVEIRA, K. S.; SARAH, M. S.; OLIVEIRA FILHO, A. S. B.; LUIZ, R. M. P.; PALARETTI L. Silicon to mitigate stress due to manganese deficiency and water deficit in pre-sprouted sugarcane seedlings. **Revista Científica**, v. 48, n. 2, p. 170-187, 2020.

WANG, G.; BRONSON, K. F.; THORP, K. R.; MON, J.; BADARUDDIN, M. Multiple leaf measurements improve efective ness of chlorophyll meter for durum wheat nitrogen management. **Crop Science**, v. 54, n. 2, p. 817–826, 2014.

XIONG, J.; ZHANG, L.; FU, G. F.; YANG, Y. J.; ZHU, C.; TAO, L. X. Drought induced proline accumulation is uninvolved with increased nitric oxide, which

alleviates drought stress by decreasing transpiration in rice. **Journal of Plant Research**, v. 125, n. 1, p. 155–164, 2012.

ZHANG, Y.; SHI, Y.; GONG, H.; ZHAO, H.; LI, H; HU, Y.; WANG, Y (2018) Beneficial effects of silicon on photosynthesis of tomato seedlings under water stress. **Journal of Integrative Agriculture**, 17: 2151-2159.

ZHU, Y.; GONG, H. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 34, n.2, p. 455-472, 2013.

ZHU, Y. X.; GUO, J.; FENG, R. JIA, J. H.; HAN, W. H.; GONG, H. J. The regulatory role of silicon on carbohydrate metabolism in *Cucumis sativus* L. under salt stress. **Plant and Soil**, v. 406, n. 1-2, p. 231–249, 2016.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sob as condições de déficit hídrico a que foram expostas, pode se observar que as mudas de *Dipteryx alata* tratadas com silício e cultivadas sob ambientes de sombreamento apresentaram comportamento adaptativo, onde as plantas tratadas com 0,75 mL de silício e 70% de sombreamento conseguiram reduzir os danos causados ao metabolismo fotossintético, fazendo com que a espécie conseguisse manter sua atividade metabólica por mais tempo até atingir a fotossíntese próxima à zero. A associação do silício com sombreamento promoveu recuperação mais rápida, sugerindo que essa espécie apresenta plasticidade fisiológica, resposta importante e desejável uma vez que ela é encontrada em áreas sujeitas a condições estressantes, causadas pelas grandes variações de temperaturas, disponibilidades hídricas e luminosas. Sugere-se que as mudas de *D. alata* apresentam alta capacidade de resiliência em função de plasticidade fisiológica. Esse comportamento é importante em projetos de recuperação de áreas degradadas uma vez que, geralmente, em áreas antropizadas há oscilações quanto à disponibilidade hídrica no solo, e essa resiliência contribui no potencial de sobrevivência dessa espécie.