

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS**

**SOMBREAMENTO E APLICAÇÃO DE SILÍCIO EM  
MUDAS DE *Hymenaea courbaril* L. SOB DÉFICIT HÍDRICO E  
SEU POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO**

**LUCAS COUTINHO REIS**

**DOURADOS  
MATO GROSSO DO SUL  
2022**

**SOMBREAMENTO E APLICAÇÃO DE SILÍCIO EM MUDAS DE  
*Hymenaea courbaril* L. SOB DÉFICIT HÍDRICO E SEU POTENCIAL  
DE RECUPERAÇÃO**

LUCAS COUTINHO REIS  
Tecnólogo em Agroecologia

Orientadora: PROF(A) DR. 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).

R375s Reis, Lucas Coutinho  
SOMBREAMENTO E APLICAÇÃO DE SILÍCIO EM MUDAS DE *Hymenaea courbaril* L.  
SOB DÉFICIT HÍDRICO E SEU POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO [recurso eletrônico] / Lucas  
Coutinho Reis. -- 2022.  
Arquivo em formato pdf.  
  
Orientador: 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. Luminosidade. 2. Estresse hídrico. 3. Silício. 4. Enzimas antioxidantes. 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.

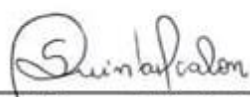
**SOMBREAMENTO E APLICAÇÃO DE SILÍCIO EM MUDAS DE *Hymenaea courbaril* L. SOB DÉFICIT HÍDRICO E SEU POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO**

Por

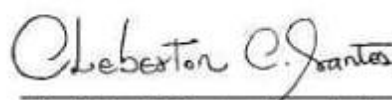
Lucas Coutinho Reis

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

Aprovado em: 09/02/2022



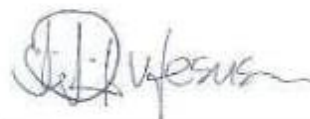
Prof. Dra. Silvana de Paula Quintão Scalon  
Orientadora-UFGD/FCA



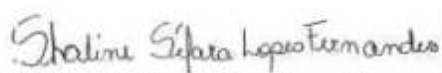
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos  
UFGD/FCA



Prof. Dra. Alessandra Mayumi Tokura Alovist  
UFGD/FCA



Prof. Dr. Mailson Vieira Jesus  
UNIGRAN



Prof. Dra. Shaline Séfara Lopes Fernandes  
UEMS

Á minha filha Sofia

Minha mãe Elza

Meu pai Valdir

Meu irmão Tiago

Á minha esposa Andressa

**Dedico**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Universidade Federal da Grande Dourados através da Faculdade de Ciências agrárias pela oportunidade de formação e seguimento da carreira acadêmica.

Ao Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa.

A minha professora orientadora Dra. Silvana de Paula Quintão Scalon pela parceria desses anos todos, excelente orientação e, principalmente, por ser uma “mãe” nas horas vagas.

A minha Esposa Andressa Caroline Foresti, pelo companheirismo na vida e na pesquisa, pelo amor dedicado a mim e nossa família.

Ao Dr. Cleberton Correia Santos, pela co-orientação, pela ajuda ao longo da condução do meu experimento e escrita.

À Daiane Mugnol Dresch, pelos esclarecimentos quando necessários e co-orientação.

Ao Maílson Vieira Jesus, Vânia Tomazelli de Lima e a Jéssica Aline Linné, pela ajuda ao longo da condução do meu experimento e análises de laboratório.

A todos que direta e indiretamente contribuíram para a finalização deste trabalho.

## SUMÁRIO

RESUMO: .....	viii
ABSTRACT: .....	ix
1. INTRODUÇÃO GERAL .....	11
2. HIPÓTESE .....	15
3. OBJETIVOS.....	15
3.1.1. OBJETVO GERAL .....	15
3.1.2. OBJETVOS ESPECIFICOS .....	15
4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	16
Capitulo I- O SOMBREAMENTO MITIGA O DÉFICIT HÍDRICO EM MUDAS DE <i>Hymenaeacourbaril</i> L.?.....	23
Resumo-.....	23
Abstract: .....	23
INTRODUÇÃO.....	24
MATERIAL E MÉTODOS.....	25
RESULTADOS .....	29
DISCUSSÃO .....	39
CONCLUSÃO.....	43
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	43
Capítulo II. SILICATO DE POTÁSSIO ALIVIA O DÉFICIT HÍDRICO E O POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO DE MUDAS DE <i>Hymenaea courbaril</i> L.....	49
Resumo-.....	49
Abstract.....	49
INTRODUÇÃO.....	50
DISCUSSÃO .....	64
CONCLUSÃO.....	67
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	67
CONCLUSÕES FINAIS .....	74

## **SOMBREAMENTO E APLICAÇÃO DE SILÍCIO EM MUDAS DE *Hymenaea courbaril* L. SOB DÉFICIT HÍDRICO E SEU POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO**

**RESUMO:** Dentre as espécies potenciais para o plantio e recuperação de áreas degradadas encontra-se o jatobá (*Hymenaea courbaril* L.) uma espécie amplamente distribuída na região Neotropical, tolerante a diferentes condições ambientais. No entanto, baixa disponibilidade hídrica no solo pode ser fator limitante para o seu metabolismo e crescimento. Assim, o uso de tecnologias que possam aliviar a condição de estresse torna-se cada vez mais estudadas, como a utilização de sombreamento e concentrações de Silicato de potássio ( $K_2SiO_3$ ). Com isso, objetivou-se avaliar o efeito de níveis de sombreamento e da aplicação de  $K_2SiO_3$  em mudas de *H. courbaril* submetidas a déficit hídrico e o potencial de recuperação do metabolismo fotossintético, enzimático e crescimento das mudas após a suspensão do estresse. Os tratamentos foram arranjos no delineamento inteiramente casualizado em esquema de parcela subdividida. As mudas para o experimento de sombreamento e déficit hídrico foram separadas em quatro grupos baseando-se nos seguintes regimes hídricos: Irrigação contínua – I: manteve-se 75% da capacidade de retenção de água e Déficit hídrico – E, caracterizado pela suspensão da irrigação. Os regimes hídricos foram associados aos seguintes tempos de avaliação: F0 – quando a taxa fotossintética das mudas submetidas à suspensão da irrigação alcançou valores próximos a zero e REC – quando a taxa fotossintética das mudas que tiveram a irrigação suspensa foram reirrigadas e alcançaram valores semelhantes ao das plantas controles (no mesmo nível de sombreamento). Assim, os tratamentos foram os seguintes: Irrigação na Fotossíntese zero (IF0), Déficit na Fotossíntese zero (EF0); Irrigação na Recuperação (IREC), Estresse na Recuperação (E REC). As mudas foram alocadas em 4 níveis de sombreamentos: 0%, 30%, 50% e 70%. As mudas para o experimento de  $K_2SiO_3$  receberam cinco doses de silicato de potássio ( $K_2SiO_3$ ) via foliar: 0,0; 3,0; 6,0; 9,0; e 12,0 mL L<sup>-1</sup> e, posteriormente, foram submetidas a dois regimes hídricos: I: irrigação realizada diariamente e E: estresse, submetidas à suspensão da irrigação. As mudas foram avaliadas em dois períodos: F0= fotossíntese próximo a zero, realizada por meio de monitoramento diário; e REC= recuperação, realizou-se a retomada da irrigação até que as mudas de cada tratamento apresentaram valores de fotossíntese, próximo as mudas irrigadas. Em ambos os experimentos foram avaliadas características fisiológicas, de crescimento, da atividade de enzimas antioxidantes e prolina. As mudas de *H. courbaril* apresentam sensibilidade ao déficit hídrico, pois ocorreu redução das trocas gasosas, indicadores da fluorescência da clorofila *a* e o crescimento e qualidade das mudas. Quando



sombreadas e reirrigadas as mudas previamente estressadas podem recuperar seu metabolismo fotossintético sem danos permanentes na eficiência do fotossistema II, e com retomada do crescimento e qualidade das mudas. A aplicação de  $K_2SiO_3$  na dose de 6,00 mL  $L^{-1}$  mitigou o efeito estressante sobre o aparato fotossintético e auxiliou na recuperação morfofisiológica das mudas. Ocorreu aumento da atividade da superóxido dismutase e peroxidase e redução de proteínas nas folhas e raízes com a aplicação de  $K_2SiO_3$ . A *H. courbaril* apresenta alta resiliência por plasticidade fisiológica. Concluiu-se que os sombreamentos de 30 e 50% auxiliam na mitigação do déficit hídrico. O déficit de água associado ao cultivo sem sombreamento (0%) não deve ser adotado no cultivo ou transplante de mudas de *H. courbaril*, a aplicação de silicato de potássio na dose próxima de 6,00-7,00 mL  $L^{-1}$  contribui no aumento de enzimas antioxidantes, que auxiliam na mitigação do efeito estressante do déficit hídrico e auxilia na resiliência da espécie.

**Palavras-chave:** Luminosidade, silício, jatobá, plasticidade fisiológica, enzimas antioxidantes. Estresse hídrico.

#### **SHADED AND APPLICATION OF SILICON IN SEEDLINGS OF *Hymenaea courbaril* L. UNDER WATER DEFICIT AND ITS RECOVERY POTENTIAL**

**ABSTRACT:** Among the potential species for planting and recovery of degraded areas is jatobá (*Hymenaea courbaril* L.) a species widely distributed in the Neotropical region, tolerant to different environmental conditions. However, the low availability of water in the soil can be a limiting factor for its metabolism and growth. Thus, the use of technologies that can facilitate the increasingly used stress condition, such as the use of power silicon ( $K_2SiO_3$ ). Therefore, the objective was to evaluate the effect of shading levels and  $K_2SiO_3$  application on *H. courbaril* seedlings. On water deficit and the potential for photosynthetic and enzymatic metabolism recovery and seedling growth after the suspension of stress. The treatments were arranged in a completely randomized design in a split-plot scheme. The seedlings for the shading and water deficit experiment were separated into four groups based on the following water regimes. Continuous irrigation – I: 75% of the water retention capacity was maintained and Water Deficit – S, characterized by the suspension of irrigation. The water regimes were associated with the following evaluation times: F0 - when the photosynthetic rate of seedlings submitted to irrigation suspension reached values close to zero and REC - when the photosynthetic rate of seedlings that had irrigation suspended were re-irrigated and reached values similar to the control plants (at the same shading level). Thus, the treatments were as follows: Zero Photosynthesis Irrigation (IP0), Zero Photosynthesis

Stress Deficit (SP0); Irrigation in Recovery (IREC), Stress in Recovery (S REC). The seedlings were allocated in 4 levels of shading: 0%, 30%, 50% and 70%. The seedlings for the  $K_2SiO_3$  experiment received five doses of potassium silicate ( $K_2SiO_3$ ) via foliar: 0.0; 3.0; 6.0; 9.0; and 12.0 mL L<sup>-1</sup> and, later, they were submitted to two water regimes: I: irrigation performed daily and E: stress, submitted to irrigation suspension. Seedlings were evaluated in two periods: P0= photosynthesis close to zero, performed by means of daily monitoring; and REC= recovery, irrigation was resumed until the seedlings of each treatment showed photosynthesis values close to the irrigated seedlings. In both experiments activity, the characteristics of enzymes, growth, antioxidants and proline were altered. As seedlings of *H. Courbaril* change the sensitivity to water deficit, as there was a reduction in gas exchange, indicators of fluorescence change and the growth and quality of seedlings. When shaded and re-irrigated as previously stressed seedlings, they can recover their photosynthetic metabolism without permanent damage to the efficiency of photosystem II, and with the resumption of growth and seedling quality. The application of  $K_2SiO_3$  at a dose of 6.00 mL L<sup>-1</sup> mitigated the stressful effect on the photosynthetic apparatus and helped in the morphophysiological recovery of the seedlings. There was an increase in superoxide dismutase and peroxidase activity and protein reduction in leaves and roots with an application of  $K_2SiO_3$ . *H. Courbaril* has high resilience due to physiological plasticity. It is concluded that the shading of 30 and 50% help in mitigating the water deficit. The water deficit associated with the cultivation without shade (0%) should not be used in the cultivation or transplant of water seedlings of *H. Coubaril* cultivation, the application of potentiometer silica in the next dose 6.00-7.00 mL L<sup>-1</sup> in the increase of antioxidant enzymes, which help to mitigate the water deficit and help in the resilience of the species

**Keywords:** Luminosity, silicon, jatobá, physiological plasticity, antioxidant enzymes. Water stress.

## **1. INTRODUÇÃO GERAL**

### **1.1. Mudanças Climáticas e o bioma Cerrado**

As mudanças climáticas agravam potencialmente a escassez de água e afetam o desenvolvimento sustentável (HIRPA et al., 2019), além de afetar a distribuição das espécies, determinando onde elas ocorrerão, em resposta às suas tolerâncias climáticas (YIFRU et al., 2021). Nesse sentido, atenção especial deve ser dada às consequências de futuras mudanças climáticas para áreas que possuem um elevado número de espécies endêmicas e, especialmente, naqueles que estão fortemente ameaçadas (PRIETO-TORRES et al., 2016; HIDASI-NETO et al., 2019).

O Brasil tem visto um aumento alarmante no desmatamento desde 2016, com a rápida criação de fragmentos florestais e diminuição de grandes manchas de floresta, especialmente no Cerrado (MONTIBELLERE et al., 2020). Estudos sobre a perda de vegetação nativa no Cerrado, mostram que estas áreas estão sofrendo alterações de sua biodiversidade (COLMAN et al., 2022; ZU et al., 2020), o que torna o Cerrado a savana mais rica biologicamente do mundo, em um dos pontos mais ameaçados do planeta (STRASSBURG et al., 2017; SOTERRONI et al., 2019).

O efeito adverso de mudanças climáticas sobre os recursos de água doce, potencialmente agrava os efeitos de outros estresses, que podem ser oriundos do déficit de água, a exemplo, do estresse térmico (KONAPALA et al., 2020). Portanto, estudos sobre o uso e manejo dos recursos hídricos, recuperação de áreas degradadas, com espécies nativas, com potencial econômico e ecológico são vitais, e destinam as abordagens de gestão e medidas de adaptação (KARLSSON et al., 2016), levando em consideração que as mudanças climáticas podem alterar o balanço hídrico das bacias hidrográficas (CHEN et al., 2020), causando períodos de restrições hídricas.

### **1.2. Estresse hídrico**

Os recursos hídricos estão entre os recursos naturais mais necessários para sustentar a vida e o desenvolvimento socioeconômico, sendo essencial no crescimento da vegetação e na exploração dos recursos naturais (DONG et al., 2021), e a escassez desse recurso, resulta em déficit hídrico na agricultura. O déficit hídrico é caracterizado por situações de falta de água, quando altera homeostase da planta, a sua ocorrência e duração são fatores limitantes para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas e florestais, pois o impacto que causa nas relações hídricas altera o metabolismo das plantas, influenciando negativamente na produtividade e os parâmetros de crescimento das espécies (BARBOSA et al., 2021; ROSA

et al., 2021). Esse cenário dificulta a realização de projetos de recomposição de áreas degradadas em locais onde é inviável a irrigação. É fato comprovado que, o estresse por déficit hídrico, pode limitar o desenvolvimento das plantas cultivadas, mais que qualquer outro fator abiótico ambiental, haja vista ser a água o principal componente dos processos fisiológicos, bioquímicos, moleculares e morfológicos das plantas (SCALON et al., 2020).

### **1.3. Alterações nas plantas pelo déficit hídrico**

As plantas quando submetidas às condições de déficit hídrico, sofrem alterações em todos os níveis de organização morfofisiológicos (BENTO et AL., 2016). O déficit hídrico induz a planta ao acúmulo de ácido abscísico, afetando a abertura estomática e, conseqüentemente, reduzindo a condutância estomática e as trocas gasosas que é o processo fisiológico e bioquímico básico das plantas e uma das principais reações químicas fornecedoras de energia (CREMON et al., 2020; BARTIERES et al., 2020; BARBOSA et al., 2021; ROSA et al., 2021), conseqüentemente com efeitos negativos.

O crescimento da planta, acúmulo de matéria seca, taxa fotossintética líquida da planta, a taxa de transpiração, a condutância estomática e a concentração intercelular de CO<sub>2</sub> mudam de acordo com as alterações nos fatores ambientais, tais como: disponibilidade de água, luz, umidade e temperatura (VERRYCKT et al., 2020; HATAMIAN et al., 2020). O déficit hídrico pode, também, afetar a síntese de fotoassimilados e a produção da cultura, por resultar em menor taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> e menor mobilização de reservas para o crescimento e manutenção das plantas sob estresse (BARTIERES et al., 2020; ROSA et al., 2021).

O uso da fluorescência da clorofila como indicador de estresse se deve ao fato dela ser um fator fisiológico que determina os processos primários relacionados à fotossíntese, tais como, transferência de energia de excitação, absorção de luz e fotoquímica, reações ocorridas no FSII (ASHRAF 2012; REIS et al., 2020). Além disso, é importante notar que as características da fluorescência da clorofila *a* são importantes no conhecimento da dinâmica dos processos fotoquímicos em FSII e pode contribuir para o diagnóstico de condições de estresse para plantas (REIS et al., 2020).

Além de alterações na fluorescência da clorofila *a*, as plantas aumentam a eficiência do sistema antioxidante de acordo com a capacidade de tolerância da espécie aos efeitos causados pelas espécies reativas de oxigênio (LINNÉ et al., 2021). Algumas espécies, quando expostas ao estresse hídrico, podem apresentar acúmulo de prolina, que representa

mecanismo regulador da perda de água, mediante aumento da osmolaridade celular (diminuição do potencial osmótico) (BHASKARA et al., 2015).

Estudos avaliaram as respostas metabólicas das plantas de *Campomanesia xanthocarpa* (Mart.) O. Berg. e *Copaifera langsdorffii* ao estresse hídrico em combinação com diferentes níveis de sombreamentos (CREMON et al., 2020; BARTIERES et al., 2020; CREMON et al., 2020) observaram efeitos positivos do sombreamento na mitigação do déficit hídrico.

#### **1.4. Efeito do Sombreamento em plantas sob déficit hídrico**

As plantas usam pigmentos fotossintéticos para capturar a energia da luz que é utilizada no processo de fotossíntese. Assim, a luz é um dos fatores ambientais condicionantes para a sobrevivência e o crescimento das plantas (AIMI et al., 2017; LIMA et al., 2021). Além ativar certas enzimas envolvidas na fotossíntese, promover a abertura dos estômatos e regular o desenvolvimento da maquinaria fotossintética (DÖRKEN e LEPETIT, 2018).

Estudar os efeitos de diferentes níveis de sombra nas características fisiológicas das plantas é propício para revelar os padrões de crescimento das plantas, enquanto a curva de resposta da fotossíntese à luz, é particularmente crucial para estudar o processo de reação fotoquímica (EPILA et al., 2018; DU et al., 2020).

O uso de diferentes sombreamentos em mudas de espécies arbóreas, pela importância no crescimento de plantas na fase juvenil, regula o fluxo de energia nos ecossistemas florestais, sendo determinante para o desenvolvimento fisiológico e morfológico dos vegetais (AIMI et al., 2017; LIMA et al., 2021).

#### **1.5. Efeito do silicato de potássio em plantas sob déficit hídrico**

Ressalta-se que é imprescindível a recuperação da biodiversidade vegetal além de conhecimentos sobre tecnologias com o intuito de reduzir o consumo de água em áreas agrícolas e em projetos de restauração florestal. Vem-se destacando, a utilização de novas tecnologias para diminuir os danos causados pelo estresse hídrico, tais como o uso do silício (Si).

O silício (Si) é listado como o oitavo elemento mais comum na natureza e o segundo elemento mais comum encontrado no solo depois do oxigênio molecular (MA, 2015). Constitui uma parte crucial do solo na forma de silicato ou silicatos de alumínio. O

uso do silício, via aplicação foliar na forma de silicato de potássio ( $K_2SiO_3$ ) serve como um elemento biologicamente ativo e significativo para a agricultura (COSKUN et al., 2019). Os benefícios do  $K_2SiO_3$  para as plantas são bem reconhecidos (EPSTEIN, 2009; DEBONA et al., 2017), como o aumento na produtividade, tolerância ao estresse hídrico, entre outros (OLIVEIRA et al., 2019).

Vários mecanismos potenciais associados ao alívio do estresse em plantas superiores foram identificados, dentre eles o aumento do reforço estrutural (MEUNIER et al., 2017), taxa fotossintética alterada (KANG et al., 2016), mudanças na condutância estomática (HATTORI et al., 2005) e maior eficiência no uso da água (KURDALI e AL-CHAMMAA, 2013).

A adição de  $K_2SiO_3$  aumenta a regulação das atividades das enzimas antioxidantes (ZHU et al., 2014; JU et al., 2017), aumentando de defesa superóxido dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT), bem como as atividades da glutathione redutase (GR) e a concentração de glutathione (GSH) (ZHU et al., 2004; SHI et al., 2016).

#### **1.6. Características ecofisiológicas da *Hymenaea courbaril* L.**

Dentre as espécies potenciais para o plantio em projetos de recomposição de áreas encontra-se o jatobá (*Hymenaeacourbaril* L.), espécie amplamente distribuída na região Neotropical, tolerante a diferentes condições ambientais (NASCIMENTO et al., 2011; BUENO et al., 2021). É uma espécie arbórea pertencente à família Fabaceae com distribuição em toda a América Latina.

Devido à presença de uma polpa enfarinhada que envolve seu embrião (BUSATTO et al., 2013), a espécie é um importante recurso alimentar para a fauna, que dispersa suas sementes. Tal fato reforça a importância da preservação e realização de plantios da espécie em áreas degradadas destinadas à recomposição da vegetação arbórea (LIMA et al., 2010; BUENO et al., 2021). Sua madeira é robusta e amplamente utilizada na construção de estruturas externas. *H. courbaril* tem a capacidade de se desenvolver em ambientes com diferentes características edafoclimáticas (NASCIMENTO et al., 2011).

É intensamente explorada devido ao seu tamanho (altura e diâmetro do caule) e às boas características físicas de sua madeira como durabilidade de sua madeira (LACERDA et al., 2008), sendo amplamente utilizado na construção civil e na indústria moveleira (TIAGO et al., 2018)

*H. coubaril* ocorre em terrenos bem drenados e matas de galeria não-inundáveis, caracterizada como secundária tardia CARVALHO, (2003) ou climax exigente de luz Pinto et al. (2020), é amplamente explorada devido ao valor comercial e medicinal e propriedades de sua madeira, seiva, casca, fruto e sementes, esta espécie é uma candidata promissora para programas de reflorestamento ou regeneração de habitats naturais (NASCIMENTO et al., 2015; SOUSA et al., 2020). Oliveira et al. (2011) observaram em sua revisão que o jatobá está incluído entre as 25 espécies prioritárias para programas de recuperação de áreas de floresta degradada.

Conhecer a capacidade das mudas de *H. coubaril* de se aclimatar ao déficit hídrico e o efeito do sombreamento e da aplicação do  $K_2SiO_3$  sobre a possível mitigação do estresse torna-se relevante para garantir o sucesso da implantação de projetos para recuperação de áreas degradadas, enriquecimento dessas áreas ou plantio para exploração sustentável.

## **2. HIPÓTESE**

O sombreamento e o  $K_2SiO_3$  podem mitigar o efeito estressante do déficit hídrico sobre o metabolismo fotossintético, antioxidante e crescimento das mudas de *H. coubaril*.

## **3. OBJETIVOS**

### **3.1.1. OBJETIVO GERAL**

Avaliar o efeito de níveis de sombreamento e de silicato de potássio em mudas de *H. coubaril* submetidas ao déficit hídrico e o potencial de recuperação do metabolismo fotossintético, enzimático e crescimento das mudas após a suspensão do estresse.

### **3.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Avaliar a sensibilidade das mudas de *H. coubaril* ao estresse hídrico.

Avaliar o potencial de recuperação de mudas de *H. coubaril* após período de estresse.

Avaliar o efeito de níveis de sombreamento nos centros de reação dos fotossistemas, nas trocas gasosas e nas características bioquímicas em mudas de *H. coubaril* submetidas ao déficit hídrico.

Avaliar o efeito de doses de silicato de potássio nos centros de reação dos fotossistemas, nas trocas gasosas e nas características bioquímicas em mudas de *H. coubaril*, submetidas ao déficit hídrico.

#### 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIMI, S. C.; ARAUJO, M. M.; TONETTO, T. S.; TABALDI, L. A.; SALDANHA, C. W.; FARIAS, J. G.; DE OLIVEIRA, G. G. O sombreamento como fator condicionante ao plantio de espécies florestais: um estudo com *Apuleialeiocarpa*. *Bosque*, v. 38, n. 2, p. 371-379, 2017.

ALI, A.; UL HAQ, T.; MAHMOOD, R.; JAAN, M.; ABBAS, M. N. Stimulating the anti-oxidative role and wheat growth improvement through silicon under salt stress. *Silicon*, v. 11, p. 2403-2406, 2019.

ASHRAF, M. A. Waterlogging stress in plants: A review. *African Journal of Agricultural Research*, v. 7, n. 13, p. 1976-1981, 2012.

BARBOSA, L. O.; DRESCH, D. M.; SCALON, L. Q.; SCALON, S. P. Q. Ecophysiological Strategies of *Cedrela fissilis* Vell. Seedlings under Conditions of Flooding and Light Availability. *Journal of Sustainable Forestry*, p.1-16, 2021.

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. *NotulaeBotanicaeHortiAgrobotaniciCluj-Napoca*, v. 48, p. 234-244, 2020.

BENTO, L. F.; SCALON, S. P. Q.; DRESCH, D. M.; PEREIRA, Z. V. Potential for recovery of *Campomanesia xanthocarpa* Mart. ex O. Berg seedlings from water deficit. *African Journal of Agricultural Research*, v. 11, p. 2775-2785, 2016.

BHASKARA, G. B.; YANG, T. H.; VERSLUES, P. E. Dynamic proline metabolism: Importance and regulation in water limited environments. *Frontiers in Plant Science*, v. 6, p. 484, 2015.



BUENO, M. M.; LELES, P. S. S.; PINTO, M. F.; RESENDE, A. S. D.; COUTO, B. R. M.; CARVALHO, D. F. D. Water use in the growth of atlantic forest tree species seedlings under different shading levels. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 45, p. 1-14, 2021.

BUSATTO, P. C.; DA SILVA NUNES, A.; COLMAN, B. A.; DE LIMA MASSON, G. Superação de dormência em sementes de jatobá (*Hymenaea courbaril* L.). *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 8, n. 1, p. 154-160, 2013.

CARVALHO, P.E.R., Espécies Arbóreas Brasileiras, Brasília: *Embrapa Informação Tecnológica*; Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2003; 1039p.

CHEN, M.; VERNON, C. R.; GRAHAM, N. T.; HEJAZI, M.; HUANG, M.; CHENG, Y.; CALVIN, K. Global land use for 2015–2100 at 0.05 resolution under diverse socioeconomic and climate scenarios. *Scientific Data*, v. 7, n. 1, p. 1-11, 2020.

COLMAN, C. B.; GUERRA, A.; DE OLIVEIRA ROQUE, F.; ROSA, I. M.; DE OLIVEIRA, P. T. S. Identifying priority regions and territorial planning strategies for conserving native vegetation in the Cerrado (Brazil) under different scenarios of land use changes. *Science of The Total Environment*, v. 807, p. 150998, 2022.

COSKUN, D.; DESHMUKH, R.; SONAH, H.; MENZIES, J. G.; REYNOLDS, O.; MA, J. F.; KRONZUCKER, H. J.; BELANGER, R. R. The controversies of silicon's role in plants biology. *New Phytol*, v. 221, p. 67-85, 2019.

CREMON, T.; SCALON, S. P. Q.; ROSA, D. B. C. J.; DRESCH, D. M. How does *Copaiferalangsdorffii* respond to flooding under different irradiance levels?, *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, p.1-11, 2020.

DEBONA, D.; RODRIGUES, F. A.; DATNOFF, L. E. Silicon's role in abiotic and biotic plants tresses. *Annual Review of Phytopathology*, v. 55 p, 85-107, 2017.

DONG, H.; FENG, Z.; YANG, Y.; LI, P.; YOU, Z. Sustainability assessment of critical natural capital: a case study of water resources in Qinghai Province. China. *Journal of Cleaner Production*, v. 286, p. 125532, 2021.

DÖRKEN, V. M.; LEPETIT, B. Morpho-anatomical and physiological differences between sun and shade leaves in *Abies alba* Mill. (Pinaceae, Coniferales): a combined approach. *Plant, cell & environment*, v. 41, n. 7, p. 1683-1697, 2018.

DU, T.; MENG, P.; HUANG, J.; PENG, S.; XIONG, D. Fast photosynthesis measurements for phenotyping photosynthetic capacity of rice. *Plant methods*, v. 16, n. 1, p. 1-10, 2020.

EPILA, J.; HUBEAU, M.; STEPPE, K. Drought effects on photosynthesis and implications of photoassimilate distribution in <sup>11</sup>C-labeled leaves in the African tropical tree species *Maesopsis eminii* Engl. *Forests*, v. 9, n. 3, p. 109, 2018.

EPSTEIN, E. Silicon: its manifold roles in plants. *Annals of Applied Biology*, v. 155, p. 155-160, 2009.

HATAMIAN, M.; NEJAD, A. R.; KAFI, M.; SOURI, M. K.; SHAHBAZI, K. Nitrate improves hackberry seedling growth under cadmium application. *Heliyon*, v. 6, n. 1, p. e03247, 2020.

HATTORI, T.; INANAGA, S.; ARAKI, H.; AN, P.; MORITA, S.; LUXOVÁ, M.; LUX, A. Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. *Physiologia Plantarum*, v. 123, p. 459-466, 2005.

HIDASI-NETO, J.; JONER, D. C.; RESENDE, F.; DE MACEDO MONTEIRO, L.; FALEIRO, F. V.; LOYOLA, R. D.; CIANCIARUSO, M. V. Climate change will drive mammal species loss and biotic homogenization in the Cerrado Biodiversity Hotspot. *Perspectives in Ecology and Conservation*, v. 17, n. 2, p. 57-63, 2019.

HIRPA, F. A.; ALFIERI, L.; LEES, T.; PENG, J.; DYER, E.; DADSON, S. J. Streamflow response to climate change in the Greater Horn of Africa. *Climatic Change*, v. 156, n. 3, p. 341-363, 2019.

JU, S.; YIN, N.; WANG, L.; ZHANG, C.; WANG, Y. Effects of silicon on *Oryza sativa* L. seedling roots under simulated acid rain stress. *Plos ONE*, v.12, p. e0173378, 2017.

KANG, J.; ZHAO, W.; ZHU, X. Silicon improves photosynthesis and strengthens enzyme activities in the C3 succulent xerophyte *Zygophyllum xanthoxylum* under drought stress. *Journal of Plant Physiology*, v. 199, p. 76–86, 2016.

KARLSSON, I. B.; SONNENBORG, T. O.; REFSGAARD, J. C.; TROLLE, D.; BORGESSEN, C. D.; OLESEN, J. E.; JENSEN, K. H. Combined effects of climate models, hydrological model structures and land use scenarios on hydrological impacts of climate change. *Journal of Hydrology*, v. 535, p. 301-317, 2016.

KONAPALA, G.; MISHRA, A. K.; WADA, Y.; MANN, M. E. Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation. *Nature Communications*, v. 11, n. 1, p. 1-10, 2020.

KURDALI, F.; AL-CHAMMAA, M. Growth and nitrogen fixation in silicon and/or potassium fed chickpeas grown under drought and well watered conditions. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, v. 9, n. 3, 2013.

LACERDA, A. E. B.; KANASHIRO, M.; SEBBENN, A. M. Efeitos da exploração de impacto reduzido na diversidade genética e estrutura genética espacial de uma população de *Hymenaea courbaril* na floresta amazônica brasileira. *Ecologia e Manejo Florestal*, v. 255, n. 3, p. 1034-1043, 2008.

LEMES, L.; DE ANDRADE, A. F. A.; LOYOLA, R. Spatial priorities for agricultural development in the Brazilian Cerrado: may economy and conservation coexist?. *Biodiversity and Conservation*, v. 29, n. 5, p. 1683-1700, 2020.

LESTARI, D. P.; NICHOLS, J. D. Seedlings of subtropical rainforest species from similar successional guild show different photosynthetic and morphological responses to varying light levels. *Tree physiology*, v. 37, n. 2, p. 186-198, 2017.

LIMA, A. L. D. S.; ZANELLA, F.; CASTRO, L. D. M. D. Crescimento de *Hymenaeacourbaril* L. var. *stilbocarpa* (Hayne) Lee et Lang. e *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong (Leguminosae) sob diferentes níveis de sombreamento. *Acta Amazonica*, v. 40, n. 1, p. 43-48, 2010.

LIMA, M. S.; ARAUJO, M. M.; AIMI, S. C.; DE OLIVEIRA, V. V.; BERGHETTI, Á. L.; NASCIMENTO, N. F.; TAROUÇO, C. P. Use of physiological attributes to select native forest species for forest restoration in the southern Atlantic forest biome, Brazil. *Forest Ecology and Management*, v. 501, p. 1-11, 2021.

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

LIU, P.; YIN, L.; WANG, S.; ZHANG, M.; DENG, X.; ZHANG, S.; TANAKA, K. Enhanced root hydraulic conductance by aquaporin regulation accounts for silicon alleviated

salt-induced osmotic stress in *Sorghum Bicolor* L. *Environmental and Experimental Botany*, v. 111, p. 42–51, 2015.

MA, J. F.; YAMAJI, N. A cooperative system of silicon transport in plants. *Trends in Plant Science*, v. 20, n. 7, p. 435-442, 2015.

MEUNIER, J. D.; BARBONI, D.; ANWAR-UL-HAQ, M. Effect of phytoliths for mitigating water stress in durum wheat. *New Phytologist*, v. 215, p. 229–239, 2017.

MIAO, B. H.; HAN, X. G.; ZHANG, W. H. The ameliorative effect of silicon on soybean seedlings grown in potassium-deficient medium. *Annal sof Botany*, v. 105, p. 967–973, 2010.

MONTIBELLER, B.; KMOCH, A.; VIRRO, H.; MANDER, Ü.; UUEMAA, E. Increasing fragmentation of forest cover in Brazil's Legal Amazon from 2001 to 2017. *Scientificreports*, v. 10, n. 1, p. 1-13, 2020.

NASCIMENTO, H. H. C.; NOGUEIRA, R. J. M. C.; SILVA, E. C.; SILVA, M. A. Análise do crescimento de mudas de jatobá (*Hymenaea courbaril* L.) em diferentes níveis de água no solo. *Revista Árvore*, v. 35, p. 617-626. 2011.

NASCIMENTO, H. H. C.; SANTOS, C. A.; FREIRE, C. S.; SILVA, M. A.; NOGUEIRA, R. J. M. C. Ajustamento osmótico em mudas de jatobá submetidas à salinidade em meio hidropônico. *Revista Árvore*, v. 39, p. 641–653, 2015.

OLIVEIRA, R.L.L.; PRADO, R. M.; FELISBERTO, G.; CRUZ, FJR. Diferentes fontes de silício por pulverização foliar no crescimento e trocas gasosas em sorgo. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 19, n. 4, p. 948-953, 2019.

OLIVEIRA, W. L.; MEDEIROS, M. B.; MOSER, P.; PINHEIRO, R.; OLSEN, L. B. Regeneração e estrutura populacional de jatobá-da-mata (*Hymenaea courbaril* L.), em dois fragmentos com diferentes graus de perturbação antrópica. *Acta Botanica Brasilica*, v. 25, p. 876-884, 2011.

PINTO, R. B.; TOZZI, A. M. G. A.; MANSANO, V. F. 2020. *Hymenaea* in *Flora do Brasil 2020*. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB22972>>. Acesso em: 12 fev. 2022.

PRIETO-TORRES, D. A.; NAVARRO-SIGÜENZA, A. G.; SANTIAGO-ALARCON, D.; ROJAS-SOTO, O. R. Response of the endangered tropical dry forests to climate change and the role of Mexican Protected Areas for their conservation. *Global change biology*, v. 22, n. 1, p. 364-379, 2016.

REIS, L. C.; SCALON, S. P.; DRESCH, D.; 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 Cluj-Napoca*, v.48, p. 210-220, 2020.

ROSA, D. B. C. J.; SCALON, S. P. Q.; DRESCH, D. M. Shading for water stress mitigation in *Copaifera langsdorffii* Desf. Seedlings. *South African Journal of Botany*, v.140, p. 240-248, 2021.

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

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, p. 196, 2016.

SOTERRONI, A. C.; RAMOS, F. M.; MOSNIER, A.; FARGIONE, J.; ANDRADE, P. R.; BAUMGARTEN, L.; POLASKY, S. Expanding the soy moratorium to Brazil's Cerrado. *Science advances*, v. 5, n. 7, p. 7336, 2019.

SOUSA, D. D. C. V. D.; BESSA, L. A.; SILVA, F. G.; ROSA, M.; VASCONCELOS FILHO, S. D. C.; VITORINO, L. C. Morpho-Anatomical and Physiological Responses Can Predict the Ideal Period for the Transplantation of Hydroponic Seedlings of *Hymenaea courbaril*, a Neotropical Fruit Tree. *Plants*, v. 9, p. 721, 2020.

STRASSBURG, B. B.; BROOKS, T.; FELTRAN-BARBIERI, R.; IRIBARREM, A.; CROUZEILLES, R.; LOYOLA, R.; BALMFORD, A. Moment of truth for the Cerrado hotspot. *Nature Ecology & Evolution*, v. 1, n. 4, p. 1-3, 2017.

TIAGO, P. V.; ROSSI, A. A. B.; CARPEJANI, A. A.; TIAGO, A. V.; DA ROCHA, V. D., FERNANDES, J. M.; DA SILVA, I. V. Diversidade genética e estrutura populacional de Jatobá: uma espécie com potencial econômico para a Amazônia. *Ciência Florestal*, v. 28, n. 2, p. 515-524, 2018.

VERRYCKT, L. T.; VAN LANGENHOVE, L.; CIAIS, P.; COURTOIS, E. A.; VICCA, S.; PEÑUELAS, J.; JANSSENS, I. A. Coping with branch excision when measuring leaf net photosynthetic rates in a lowland tropical forest. *Biotropica*, v. 52, n. 4, p. 608-615, 2020.

VIEIRA, R. R. S.; RIBEIRO, B. R.; RESENDE, F. M.; BRUM, F. T.; MACHADO, N.; SALES, L. P.; LOYOLA, R. Compliance to Brazil's Forest Code will not protect biodiversity and ecosystem services. *Diversity and Distributions*, v. 24, n. 4, p. 434-438, 2018.

YIFRU, B. A.; CHUNG, I. M.; KIM, M. G.; CHANG, S. W. Assessing the effect of land/use land cover and climate change on water yield and groundwater recharge in East African Rift Valley using integrated model. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 37, p. 100926, 2021

YIN, L.; WANG, S.; TANAKA, K.; FUJIHARA, S.; ITAI, A.; DEN, X.; ZHANG, S. Silicon-mediated changes in polyamines participate in silicon-induced salt tolerance in *Sorghum bicolor* L. *Plant, cell & environment*, v. 39, p. 245-258, 2016.

ZHANG, X.; DU, Y.; WANG, L.; ZHOU, Q.; HUANG, X.; SUN, Z. Combined effects of lanthanum (III) and acid rain on antioxidant enzyme system in soybean roots. *Plos one*, v. 10, n. 7, p. e0134546, 2015.

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

ZHU, Z.; WEI, G.; LI, J.; QIAN, Q.; YU, J. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Plant Science*, v. 167, n. 3, p. 527-533, 2004.

ZU, E. E. K.; AYRE, B.; GODAR, J.; LIMA, M. G. B.; BAUCH, S.; GARRETT, R.; GARDNER, T. Using supply chain data to monitor zero deforestation commitments: an assessment of progress in the Brazilian soy sector. *Environmental Research Letters*, v. 15, n. 3, p. 035003, 2020.

## **Capítulo I- O SOMBREAMENTO MITIGA O DÉFICIT HÍDRICO EM MUDAS DE *Hymenaea courbaril* L.?**

**Resumo-** objetivou-se avaliar o comportamento das mudas de *Hymenaea courbaril* L. sob déficit hídrico em diferentes níveis de sombreamento e seu potencial de recuperação após a retomada da irrigação. Os tratamentos foram arrançados no delineamento inteiramente casualizado em esquema de parcela subdividida. As mudas foram separadas em quatro grupos baseando-se nos seguintes regimes hídricos: Irrigação contínua – I: manteve-se 75% da capacidade de retenção de água e Déficit hídrico – E, caracterizado pela suspensão da irrigação. Os regimes hídricos foram associados aos seguintes tempos de avaliação: F0 – quando a taxa fotossintética das mudas submetidas à suspensão da irrigação alcançou valores próximos a zero e REC – quando a taxa fotossintética das mudas que tiveram a irrigação suspensa foram reirrigadas, alcançou valores semelhantes ao das plantas controle no mesmo sombreamento. Assim os tratamentos foram os seguintes: Irrigado na Fotossíntese zero (IF0), Estressado na Fotossíntese zero (EF0); Irrigado na Recuperação (IREC), Estressado na Recuperação (EREC). As mudas desses 4 tratamentos foram alocadas em 4 níveis de sombreamentos: 0%, 30%, 50% e 70%. O sombreamento de 30 e 50 % mitigam os efeitos deletérios do déficit hídrico. O déficit hídrico associado ao cultivo sem sombreamento (0%) não deve ser adotado no cultivo ou transplante de mudas de *H. courbaril*. Quando sombreadas e reirrigadas as mudas previamente estressadas podem recuperar seu metabolismo fotossintético sem alterações e/ou danos permanentes na eficiência do fotossistema II, e com retomada do crescimento e qualidade das mudas.

**Palavras-chave:** Luminosidade, Jatobá, Ecofisiologia, Estresse hídrico.

### **Chapter I- DOES SHADOW MITIGATE WATER DEFICIENCY IN SEEDLINGS OF *Hymenaea Courbaril* L.?**

**Abstract:** The objective was to evaluate the behavior of *Hymenaea courbaril* L. seedlings under water deficit at different levels of shading and their recovery potential after irrigation resumption. The seedlings were separated into four groups based on the following water regimes: Continuous Irrigation – I: 75% of the water retention capacity and Water Deficit – S characterized by the suspension of irrigation. The water regimes were associated with the following assessment times: P0 – when the photosynthesis rate had values close to zero REC – when the photosynthesis of the seedlings had irrigation suspended for the re-irrigated ones,

it reached values equal to the control plants in the shading. Thus, the treatments were as follows: Irrigated at Zero Photosynthesis (IP0), Stressed at Zero Photosynthesis (SP0); Irrigated in Recovery (IREC), Stressed in Recovery (SREC). The seedlings were placed in 4 treatments, shading levels: 0%, 30%, 50% and 70%. Shading of 30 and 50 % attenuates the deleterious effects of water deficit. The water deficit associated with cultivation without shading (0%) should not be adopted in the cultivation or transplantation of seedlings of *H. coubaril*. previously stressed seedlings and shaded a re-irrigated, they can recover their photosynthetic metabolism without changes/or permanent damage to the efficiency of photosystem II, with resumption of growth and quality.

**Keywords:** Luminosity, Jatobá, Ecophysiology, Water stress.

## INTRODUÇÃO

A baixa disponibilidade de água no solo afeta vários processos metabólicos levando à redução da área foliar, ao fechamento estomático, à menor condutância estomática, taxa fotossintética e transpiratória, redução do crescimento e produtividade. Essas condições afetam a atividade das enzimas carboxilativas, ATPase e antioxidantes (CAMPELO et al., 2015; ROSA et al., 2021). As espécies respondem de maneira diferenciada após a suspensão do estresse hídrico e essas respostas são atribuídas à plasticidade fisiológica e metabólica que garante ajustes e tolerância ao ambiente estressante (BARTIERES et al., 2020; CREMON et al., 2020; BARBOSA et al., 2021; ROSA et al., 2021).

Os mecanismos fisiológicos responsáveis pelas adaptações das plantas nativas à disponibilidade de luz ainda não foram amplamente avaliados e esclarecidos e muitas vezes uma mesma espécie é classificada em grupos sucessionais diferentes. Ortiz et al. (2021) observaram em sua revisão que as características funcionais das folhas variam entre as espécies pioneiras e de grupos sucessionais tardias. Dentre outras características, a capacidade fotossintética e a tolerância à fotoinibição são aspectos de grande interesse científico (YANG et al., 2020). As espécies tardias em altos níveis de luz são propensas à degradação da clorofila, apresentam fotoinibição e declínio irreversível na eficiência fotoquímica máxima de FSII ( $F_v/F_m$ ) que ocorre quando absorve mais luz do que é necessário para a assimilação de carbono, além de menor quantidade da enzima Rubisco, o que pode eventualmente comprometer a sobrevivência da planta (YANG et al., 2020; ORTIZ et al., 2021)



O crescimento de mudas em viveiros é diretamente influenciado por fatores como água, temperatura, umidade relativa e luminosidade. O conhecimento sobre o comportamento das plantas diante dos fatores ambientais é importante visto que é crescente a necessidade de aumentar e diversificar a produção de mudas, tanto para a silvicultura quanto para a recuperação de áreas de vegetação natural, degradadas pela atividade humana (SOUSA et al., 2020).

Dentre as espécies potenciais encontra-se o jatobá (*Hymenaeacoubaril* L.). Amplamente distribuída na região Neotropical, tolerante às diferentes condições ambientais (NASCIMENTO et al., 2015).

A espécie *H. coubaril* é amplamente explorada devido ao valor comercial, medicinal e propriedades de sua madeira, seiva, casca, fruto e semente, esta espécie é uma candidata promissora para programas de reflorestamento ou regeneração de habitats naturais (NASCIMENTO et al., 2011; SOUSA et al., 2020). Oliveira et al. (2011) observaram em sua revisão que o jatobá está incluído entre as 25 espécies prioritárias para programas de recuperação de áreas de florestas degradadas.

Conhecer a capacidade das mudas de *H. coubaril* de se aclimatar ao déficit hídrico e o efeito do sombreamento sobre a possível mitigação do estresse torna-se relevante para garantir o sucesso da implantação de projetos para recuperação de áreas degradadas, enriquecimento dessas áreas ou plantio para exploração sustentável. Assim, considerando a hipótese de que o sombreamento pode mitigar o efeito estressante do déficit hídrico sobre o metabolismo fotossintético, antioxidante e crescimento das mudas de *H. coubaril*, objetivou-se avaliar o comportamento das mudas de *H. coubaril* sob déficit hídrico em níveis de sombreamento e seu potencial de recuperação após a retomada da irrigação.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Local do experimento**

O experimento foi realizado na Faculdade de Ciências Agrárias (22°11'43.7"S e 54°56'08.5"W, 452 m), da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), em Dourados – MS, Brasil.

### **Coleta dos frutos e produção das mudas**

As mudas de *Hymenaea courbaril* L. utilizadas para os experimentos foram produzidas a partir de frutos coletados na região da Grande Dourados em árvore que estava em meio a fragmentos florestais em de janeiro de 2020. Afim de manter a padronização genética das mudas, os frutos foram coletados apenas de uma matriz. Após a coleta dos frutos foi realizado a extração, seleção e limpeza das sementes, as quais foram escarificadas mecanicamente conforme Costa et al. (2017), para facilitar a embebição de água, acelerando a germinação.

A sementeira foi realizada no dia 05/01/2020, em viveiro com tela de sombrite de 50% em bandeja 125 células com substrato comercial, a emergência total ocorreu 15 dias após a sementeira (DAS) e o transplante para vasos de 7 litros aos 30 DAS. Os vasos foram previamente preenchidos com Latossolo Vermelho distroférrico (SANTOS et., 2018) + areia grossa (3:1, v/v) permanecendo com irrigações diárias de 75% da capacidade de retenção de água por 40 dias, momento em que as mudas apresentaram altura média de 24 cm e foi realizado o início do experimento com suspensão da irrigação.

### **Delineamento**

Os tratamentos foram arranjados no delineamento inteiramente casualizado em esquema de parcela subdividida, sendo alocados nas parcelas a combinação dos Regimes Hídricos+Épocas de Avaliação, e nas subparcelas os diferentes sombreamentos, com três repetições, sendo a unidade experimental um vaso com 2 mudas cada.

### **Tratamentos**

As mudas foram separadas em quatro grupos baseando-se nos seguintes regimes hídricos: Irrigação contínua – I: manteve-se 75% da capacidade de retenção de água no substrato por meio do método gravimétrico (SOUZA et al., 2000) sendo que as mudas nestas condições hídricas foram consideradas (Controle) e Déficit hídrico – E, caracterizado pela suspensão da irrigação.

Os regimes hídricos foram associados aos seguintes tempos de avaliação: F0 – quando a taxa fotossintética das mudas submetidas à suspensão da irrigação alcançou valores próximos a zero, nesse momento, as mudas foram reirrigadas e REC – quando a taxa fotossintética das mudas que tiveram a irrigação suspensa/reirrigadas, alcançou valores semelhantes ao das plantas controle. Assim os tratamentos foram os seguintes: Irrigado na Fotossíntese zero (I F0), Estressado na Fotossíntese zero (E F0); Irrigado na Recuperação (I REC), Estressado na Recuperação (E REC).

A fotossíntese zero foi determinada quando as mudas de quaisquer sombreamentos chegassem próximo a zero. Sendo neste experimento as mudas 0% de sombreamento com taxa fotossintética de  $0,31 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  aos 10 dias após a suspensão da irrigação. O período de recuperação foi considerado para o regime hídrico em cada sombreamento.

As mudas desses 4 tratamentos foram alocadas em 4 níveis de sombreamentos: 0% (0), 30% (30), 50% (50) e 70% (70), obtidos com uso de telas de nylon tipo sombrite®. As mudas foram mantidas sob lona plástica transparente para evitar as precipitações que pudessem ocorrer durante o período.

### **Características avaliadas**

#### **Trocas gasosas**

Com auxílio do medidor portátil de fotossíntese LCIPro- SD ADC BioScientific Ltd., foram avaliados a taxa fotossintética ( $A$  -  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), condutância estomática ( $G_s$  -  $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), concentração intercelular de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$  -  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ); além da eficiência de carboxilação da Rubisco ( $A/C_i$ ), eficiência no uso da água ( $A/E$ ).

#### **Os teores de clorofila “a”, “b”, total ( $\mu\text{g cm}^2$ ) e carotenoides ( $\mu\text{g cm}^2$ )**

Foram quantificados, coletando-se uma lâmina foliar totalmente expandida por planta. Foi pesado 1 g, macerando-se com pistilo em almofariz, em 8 mL de acetona a 80%, conforme (Junior et al., 2010). Posteriormente, as soluções foram levadas para centrifugação utilizando microcentrífuga (MCD-200, H. T.) à velocidade de 1.500 rpm, durante 10 minutos. Em seguida, realizou-se a leitura da absorvância nos comprimentos de onda de 470, 645 e 663 nm, utilizando-se espectrofotômetro (SP-220, Biospectro). As concentrações dos teores de clorofilas e carotenoides foram calculadas de acordo com as propostas de Arnon (1949) e Lichtenthaler e Buschman (2001), respectivamente

#### **A fluorescência da clorofila a:**

Avaliada a eficiência quântica potencial do fotossistema II ( $F_v/F_m$ ) utilizando fluorômetro portátil modelo OS-30p (Opti-Sciences Chlorophyll Fluorometer, Hudson, USA) e a partir das medidas de fluorescência inicial ( $F_0$ ), fluorescência máxima ( $F_m$ ) foram calculados a eficiência efetiva da conversão de energia absorvida ( $F_v/F_0$ ) e a produção quântica basal dos processos não fotoquímicos no FSII ( $F_0/F_m$ ).

As determinações da fluorescência e das trocas gasosas foram realizadas entre 8:00 e 11:00 horas da manhã, nas mesmas folhas do segundo par de folhas totalmente expandidas. Para a fluorescência, as folhas foram submetidas a um período de 30 minutos de adaptação ao escuro com o auxílio de cliques adaptadores, para que todos os centros de reação nessa

região foliar adquirissem a condição de “aberto”, ou seja, oxidação completa do sistema fotossintético de transporte de elétrons. O fluxo de fótons fotossintéticos (DFFF) de 988; 691, 510 e 280  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  DFFF sob 0%, 30%, 50 e 70% de tonalidade respectivamente.

### **Proteínas totais em folhas (mg)**

Realizada por meio da determinação quantitativa pelo método de Bradford (1976), sendo que no preparo do extrato foram utilizadas material fresco congelados em nitrogênio líquido. As leituras de absorvância foram realizadas em triplicatas no comprimento de onda de 595nm. Sendo a proteína (PROT) expressa em mg de proteína por g de  $\text{MF}^{-1}$ .

### **Atividade das enzimas antioxidantes**

Atividade de enzimas antioxidantes: avaliada nas folhas e raízes de cada tratamento utilizando tecidos congelados em nitrogênio líquido. Uma quantidade de 1 g de cada amostra foi pesada e macerada em uma solução de 6 mL contendo 0,3 g de polivinilpirrolidona (PVP) diluída em 100 mL de tampão fosfato de potássio (0,2 M) (COSTA et al., 2020). Posteriormente, as amostras foram centrifugadas a 4000 rpm por 10 minutos e o sobrenadante foi usado como um extrato enzimático para determinar a superóxido dismutase (SOD,  $\mu\text{g MF}^{-1}$ ) e a atividade da peroxidase (POD,  $\mu\text{mol mg}^{-1} \text{proteína min}^{-1}$ ), de acordo com Broetto (2014).

### **Prolina**

A quantificação da prolina ( $\mu\text{g/mL}$ ) com material seco das folhas foram realizadas de acordo com a metodologia descrita por Dianat et al. (2016)

**O Conteúdo relativo de água nas folhas (CRA)**, foi determinado em quatro folhas de cada tratamento, segundo a expressão matemática:

$$CRA = 100 \times \frac{(Massa\ fresca - Massa\ seca)}{(Massa\ saturada - Massa\ seca)}$$

As folhas foram coletadas entre 7:00 e 10:00 horas da manhã e cortadas com cilindros de área conhecida. Após pesagem da massa fresca, foram colocados em placas de petri com água destilada por 24 h para saturação. Após pesagem dos discos saturados eles foram secos para determinação da massa seca.

**Crescimento:** Comprimentos **de raiz**, medidos com auxílio de uma régua graduada em centímetros (cm) e os resultados expressos em centímetros. **Área foliar** medida com auxílio do aparelho Li 3100 – Area Meter e os resultados expressos em  $\text{cm}^2$ . altura da parte

aérea (PA), do diâmetro do coleto (D), massa seca total (PMST) que é dado pela soma da massa seca da parte aérea (PMSPA) e das raízes (PMSR), a secagem da parte aérea e raiz foi realizada em estufa de circulação forçada de ar, regulada a  $70^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  por 72 horas e mensurados com auxílio de uma balança analítica de precisão (0,0001g).

**Qualidade das mudas:** foi determinado utilizando o Índice de Qualidade de Mudas Dickson et al. (1960) em função da seguinte equação.

$$IQD = \frac{PMST}{\left(\frac{PA}{D}\right) + \left(\frac{PMSPA}{PMSR}\right)}$$

### **Análises dos dados**

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), e quando significativos pelo teste F ( $p < 0,05$ ) as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, para regimes hídricos, e pelo teste de Scott-Knott para épocas de avaliação ( $p < 0,05$ ), utilizando o software SISVAR (FERREIRA, 2019).

## **RESULTADOS**

### **Resumo da análise de variância**

De acordo com a análise de variância, as variáveis que apresentaram diferenças significativas para a relação dupla Tratamentos X Sombreamentos foram, Fotossíntese – A, condutância estomática- Gs, eficiência do uso da água – A/E, eficiência de carboxilação da RuBisCO – A/Ci, atividade enzima peroxidase nas folha e raízes- POX e o conteúdo relativo de água na folha- CRA.

O teor de Clorofila a, Clorofila b, Clorofila total, teor de carotenóides e Proteína nas folhas – POT, apresentaram diferenças significativas apenas pelo fator isolado Sombreamentos. A concentração interna de CO<sub>2</sub>- Ci, F0, Fv/Fm, Fv/F0, F0/Fm, atividade da enzima superóxido dismutase nas folhas e raízes – SOD, Prolina, comprimento da Raiz- CR, área foliar- AF e índice de qualidade de Dickson – IQD apresentaram diferenças significativas para os dois fatores isolados.

### **Períodos de Recuperação**

A recuperação dos tratamentos, após a fotossíntese zero ocorreu em dias diferentes, levando a diferentes tempos de recuperação sendo 8, 6, 3 e 5 dias, para os respectivos sombreamentos 0, 30, 50 e 70% conforme Figura 1.

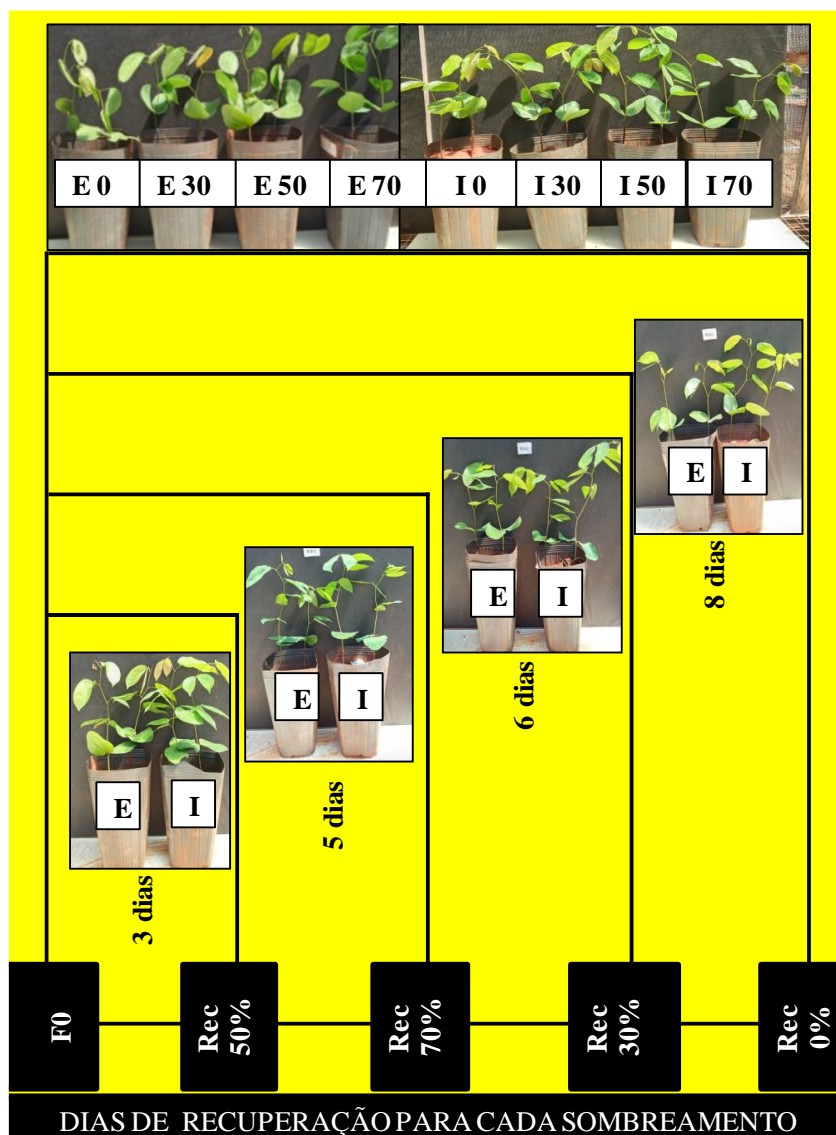


Figura 1. Avaliação da recuperação das mudas em cada regime hídrico e sombreamento após a reidratação. Fotossíntese zero- F0. Déficit hídrico- E, irrigação contínua- I. Reis, 2021.UFGD, Dourados – MS.

### Trocas gasosas

Observamos que nas plantas sob déficit hídrico, na fotossíntese zero (F0), independente do nível de sombreamento, a taxa fotossintética (A) foi inferior quando

comparada às mudas controle sob nível de sombreamento. Sob sombreamento de 50%,  $A$  foi 86,27% maior que nas mudas em 0% de sombreamento na F0. Na fase de recuperação (REC), após o estabelecimento da irrigação, as mudas previamente estressadas sob sombreamentos de 30 e 50% apresentaram taxa fotossintética superior à observada nas mudas de 0 e 70% de sombreamento (Figura2A).

A condutância estomática ( $G_s$ ) também reduziu significativamente na F0 em mudas sob deficiência hídrica em todos os níveis de sombreamento, entretanto, manteve-se maior nas mudas cultivadas sob 50 e 30% de sombreamento. No entanto na REC as mudas submetidas ao estresse e 70% de sombreamento tiveram aumento significativo das taxas de  $G_s$  sendo 26,79% maior que as mudas de 50% no mesmo regime hídrico e período de avaliação (Figura2B). Sob os maiores níveis de sombreamento (50 e 70%) a  $G_s$  foi maior quando comparada aos menores níveis de sombreamento 0 e 30%, exceto na F0.

Não houve interação entre os tratamentos para a concentração interna de carbono ( $C_i$ ), que foi maior nas mudas cultivadas sob 0% de sombreamento (Figura2C) e sob déficit hídrico na F0 (E F0) (Figura2D).

A eficiência do uso da água ( $A/E$ ) assim como para  $A$  e  $G_s$ , reduziu significativamente nas mudas sob déficit hídrico na F0, entretanto, não houve diferença significativa entre os sombreamentos para o mesmo tratamento. Na REC as mudas previamente cultivadas sob déficit hídrico nos sombreamentos de 0, 30 e 50% apresentaram a recuperação significativamente maior (Figura2E).

A eficiência de carboxilação da Rubisco ( $A/C_i$ ) na F0 também reduziu significativamente nas mudas E F0, também não ocorreu variação entre os sombreamentos. As mudas sombreadas apresentaram maior  $A/C_i$ , entretanto, a recuperação foi maior sob 30 e 50% (Figura2F).

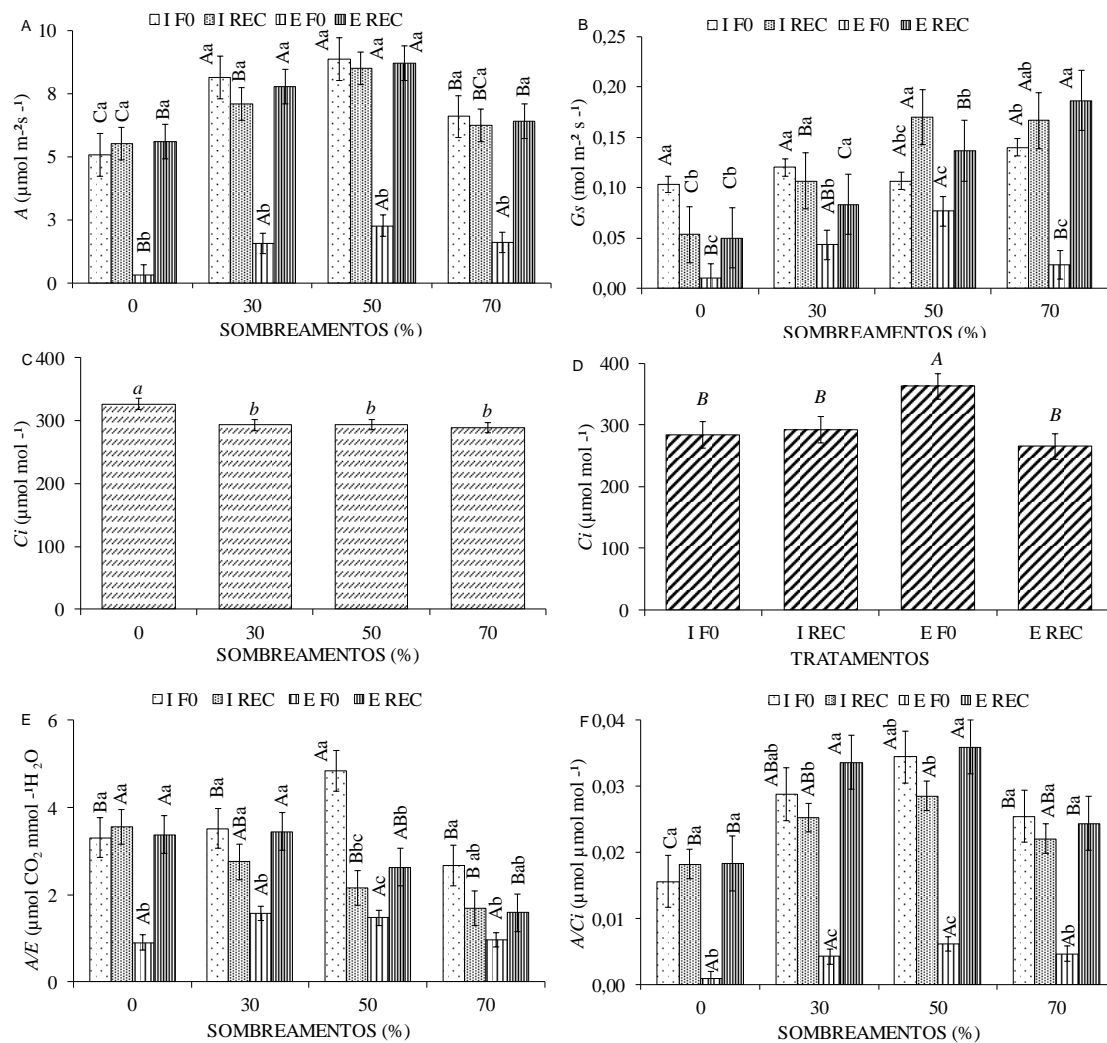


Figura 2. Valores médios dataxa fotossintética A (A.), condutância estomática  $G_s$  (B), concentração interna de  $\text{CO}_2$   $C_i$  (C, D), eficiência instantânea do uso da água  $A/E$  (E) e da eficiência instantânea de carboxilação de  $\text{CO}_2$   $A/C_i$  (F) em mudas de *Hymenaea courbaril* L. sob diferentes Regimes Hídricos + Épocas de Avaliação: Irrigado na Fotossíntese zero (I F0), Estressado na Fotossíntese zero (E F0); Irrigado na Recuperação (I REC), Estressado na Recuperação (E REC) em diferentes sombreamentos: 0% (0), 30% (30), 50% (50) e 70% (70). Letras em itálico comparam os diferentes Regimes Hídricos + Épocas de Avaliação ou os diferentes sombreamentos. Letras maiúsculas comparam o mesmo Regime Hídrico + Época de Avaliação, nos diferentes sombreamentos. Letras minúsculas comparam o mesmo sombreamento nos diferentes Regimes Hídricos + Épocas de Avaliação. Médias seguidas de letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ).

### Pigmentos fotossintéticos



O teor de clorofila *a* (Figura 3A) variou entre os sombreamentos sendo maior nas mudas sob 70% e menor sob 0% de sombreamento. A clorofila *b* (Figura 3B) foi menor nas mudas sob 30% de sombra e não variou nos demais níveis de sombreamento.

A clorofila total (Figura 3C) seguiu o padrão da clorofila *a* sendo maior nas mudas sob 70% de sombreamento e menor a 0%, seguido do 30%. Os carotenóides (Figura 3D) apresentaram comportamento inverso, sendo maior nas mudas sob 0% de sombreamento e menor a 70%.

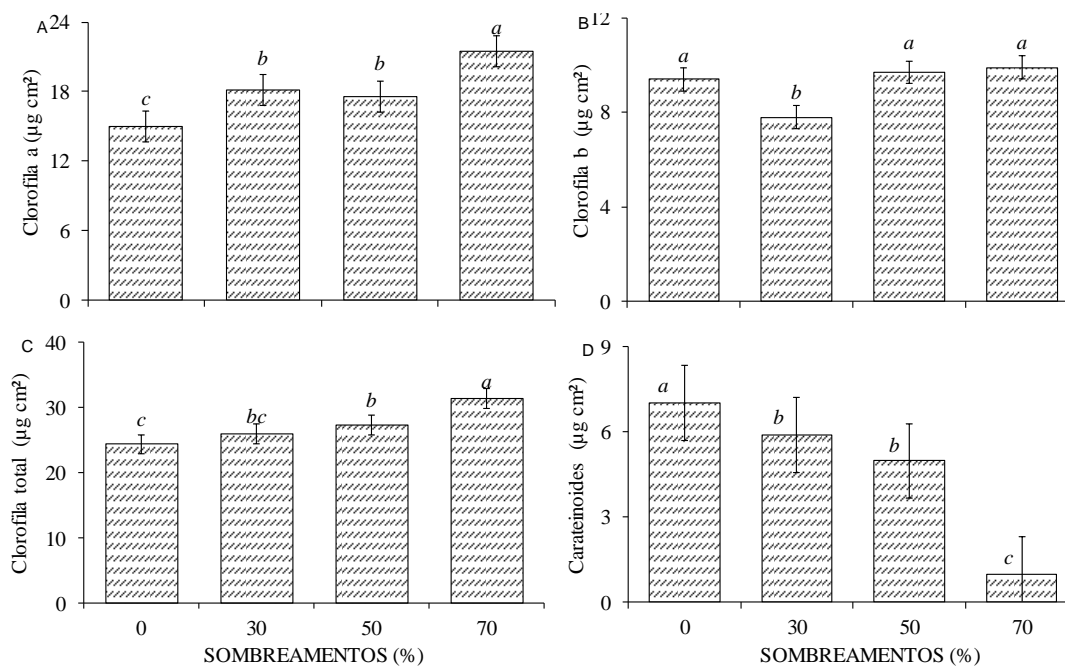


Figura 3. Valores médios da Clorofila *a* (A), Clorofila *b* (B), Clorofila total (C) e dos carotenóides (D) (µg cm<sup>2</sup>) em mudas de *Hymenaea courbaril* L. sob diferentes Regimes Hídricos+Épocas de Avaliação: Irrigado na Fotossíntese zero (I F0), Estressado na Fotossíntese zero (E F0); Irrigado na Recuperação (I REC), Estressado na Recuperação (E REC) em diferentes sombreamentos: 0% (0), 30% (30), 50% (50) e 70% (70). Letras minúsculas em itálico comparam os diferentes sombreamentos. Médias seguidas de letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste Tukey (p < 0,05).

### Fluorescência da Clorofila *a*

As mudas sob sombreamento de 0% apresentaram maior fluorescência inicial (F<sub>0</sub>). Em relação às épocas de avaliação, os maiores valores foram observados no cultivo E F0. Na REC, independente do regime hídrico, os valores foram inferiores (Figura 4 A, B). Ao

contrário da  $F_0$  a eficiência quântica do fotossistema II ( $F_v/F_m$ ) apresentou menores valores nas mudas sob 0% de sombreamento e na E F0 (Figura 4B, C).

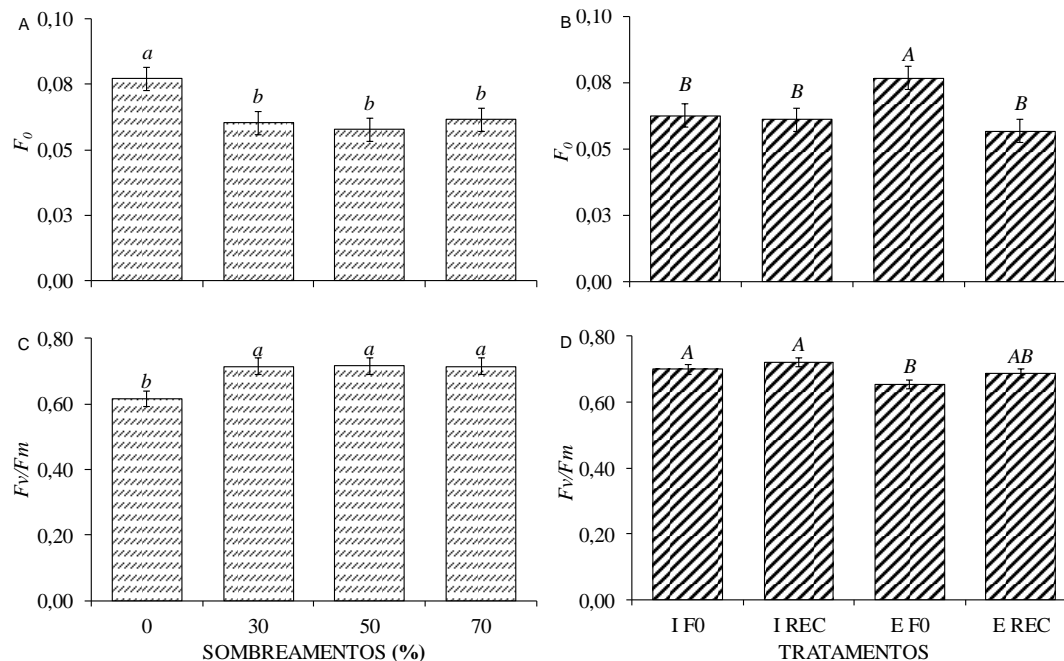


Figura 4. Valores médios da fluorescência inicial  $F_0$  (A, B) e da Eficiência quântica do fotossistema II  $F_v/F_m$  (C, D), em mudas de *Hymenaea courbaril* L. sob diferentes Regimes Hídricos+Épocas de Avaliação: Irrigado na Fotossíntese zero (I F0), Estressado na Fotossíntese zero (E F0); Irrigado na Recuperação (I REC), Estressado na Recuperação (E REC) em diferentes sombreamentos: 0% (0), 30% (30), 50% (50) e 70% (70). Letras maiúsculas comparam os diferentes Regimes Hídricos+Épocas de Avaliação. Letras minúsculas comparam os diferentes sombreamentos. Médias seguidas de letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ).

A eficiência efetiva na conversão de energia absorvida ( $F_v/F_0$ ) variou de acordo com o sombreamento, sendo maior nas mudas sob sombreamento de 30 e 50% e menor nas mudas sob 0% de sombreamento. Para os regimes hídricos+épocas as mudas E F0 apresentaram valores inferiores (Figura 5A, B).

No entanto, para produção quântica basal dos processos não fotoquímicos do fotossistema II ( $F_0/F_m$ ) ocorreu o contrário, as mudas sob 0 e 70% apresentaram maiores valores que os demais bem como as mudas E F0 (Figura 5C, D).

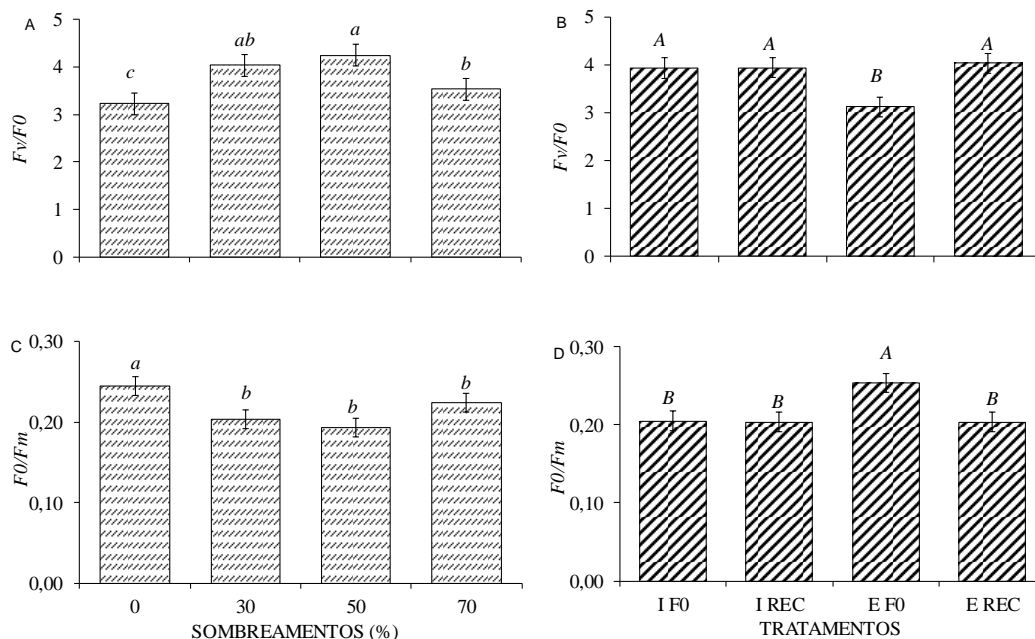


Figura 5. Valores médios da eficiência efetiva no fotossistema na conversão de energia absorvida  $F_v/F_0$ , (A, B) Produção quântica basal dos processos não fotoquímicos do fotossistema II  $F_0/F_m$  (C, D) em mudas de *Hymenaea courbaril* L. sob diferentes Regimes Hídricos+Épocas de Avaliação: Irrigado na Fotossíntese zero (I F0), Estressado na Fotossíntese zero (E F0); Irrigado na Recuperação (I REC), Estressado na Recuperação (E REC) em diferentes sombreamentos: 0% (0), 30% (30), 50% (50) e 70% (70). Letras maiúsculas comparam os diferentes Regimes Hídricos+Épocas de Avaliação. Letras minúsculas comparam os diferentes sombreamentos. Médias seguidas de letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ).

### Atividade antioxidante e bioquímica

As mudas sob sombreamento de 0 % apresentaram menores valores de proteína nas folhas em relação aos outros sombreamentos, para os regimes hídricos+épocas, as mudas E F0 apresentaram menores valores de proteína nas folhas (Figura 6A, B).

A atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) nas folhas foi maior nas mudas sob +0% de sombreamento assim como nas mudas E F0 (Figura 6C, D).

A atividade da enzima peroxidase (POX) nas folhas foi maior nas mudas sob 0% de sombreamento na E F0, comportamento semelhante ao das mudas sob 30% de sombreamento, entretanto, em ambas as condições de sombreamento após a retomada da irrigação na REC, os níveis da POX reduziram significativamente alcançando valores iguais ao das mudas controle (Figura 6E). Na Raiz a atividade da POX também foi maior nas mudas

de 0% de sombreamento na E F0 seguidas das mudas com 30%, no entanto, da REC a atividade desta enzima reduziu significativamente, mas se manteve mais elevadas nas mudas 0% (Figura 6F).

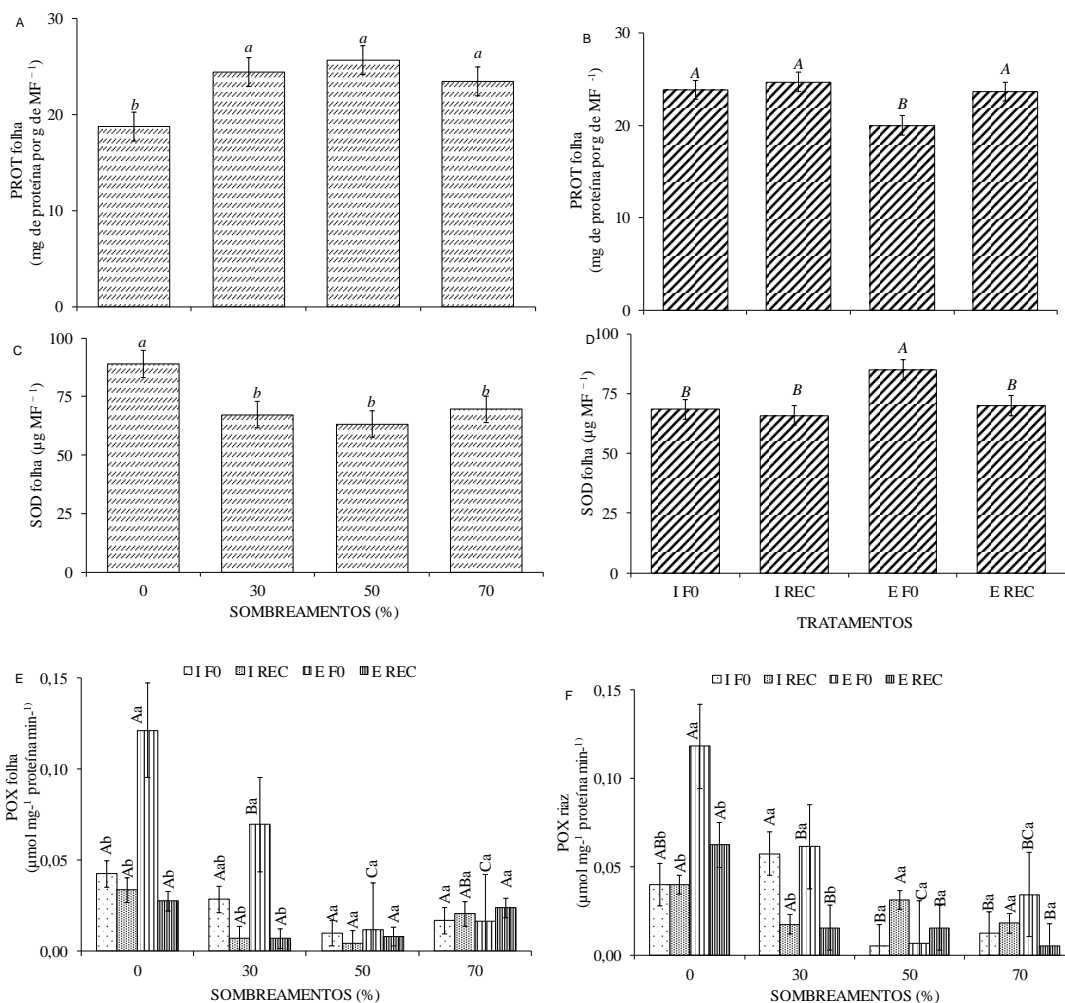


Figura 6. Valores médios da proteína (PROT/mg de proteína por g de MF<sup>-1</sup>) na folha (A, B), atividade da enzima superóxido dismutase (SOD/ μg MF<sup>-1</sup>) na folha (C, D), da enzima peroxidase (POX/ μmol mg<sup>-1</sup> proteína min<sup>-1</sup>) na folha (E) e raiz (F) em mudas de *Hymenaea courbaril* L. sob diferentes Regimes Hídricos+Épocas de Avaliação: Irrigado na Fotossíntese zero (I F0), Estressado na Fotossíntese zero (E F0); Irrigado na Recuperação (I REC), Estressado na Recuperação (E REC) em diferentes sombreamentos: 0% (0), 30% (30), 50% (50) e 70% (70). Letras em itálico comparam os diferentes Regimes Hídricos+Épocas de Avaliação ou diferentes sombreamentos. Letras maiúsculas comparam o mesmo Regime Hídrico+Época de Avaliação, nos diferentes sombreamentos. Letras minúsculas comparam o mesmo sombreamento nos diferentes Regimes Hídricos+Épocas de Avaliação. Médias seguidas de letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ).

É possível observar aumento de Prolina nas mudas sob o sombreamento 0% e nas mudas do tratamento E F0 (Figura 7A, B).

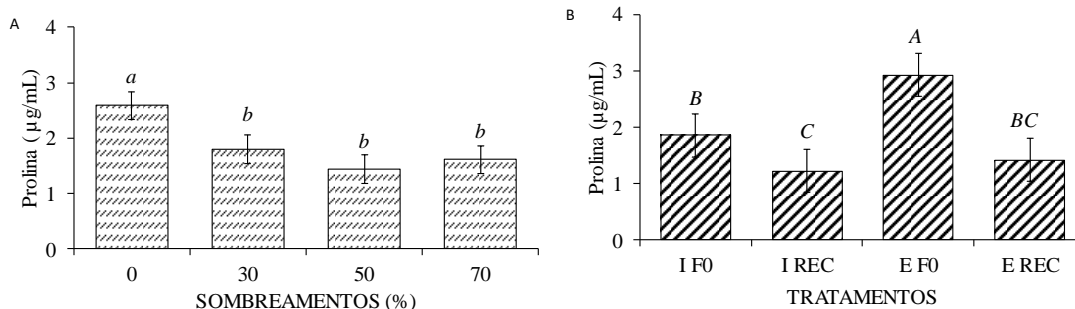


Figura 7. Valores médios do Teor de Prolina(A, B) em mudas de *Hymenaea courbaril* L. sob diferentes Regimes Hídricos+Épocas de Avaliação: Irrigado na Fotossíntese zero (I F0), Estressado na Fotossíntese zero (E F0); Irrigado na Recuperação (I REC), Estressado na Recuperação (E REC) em diferentes sombreamentos: 0% (0), 30% (30), 50% (50) e 70% (70). Letras maiúsculas em itálico comparam os diferentes Regimes Hídricos+Épocas de Avaliação. Letras minúsculas em itálico comparam os diferentes sombreamentos. Médias seguidas de letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ).

### Crescimento e qualidade das mudas

O menor comprimento da raiz foi observado nas mudas sob sombreamento de 70% e em relação aos regimes e épocas, é possível observar que na REC independente do regime hídrico, as mudas apresentaram maior comprimento da raiz com médias que não variaram entre si (Figura 8A, B).

A área foliar foi maior nos sombreamentos de 50 e 70%, menor nas mudas sob EF0 e semelhante ao CR, aumentou na REC e não variou significativamente entre os regimes hídricos (Figura 8C, D).

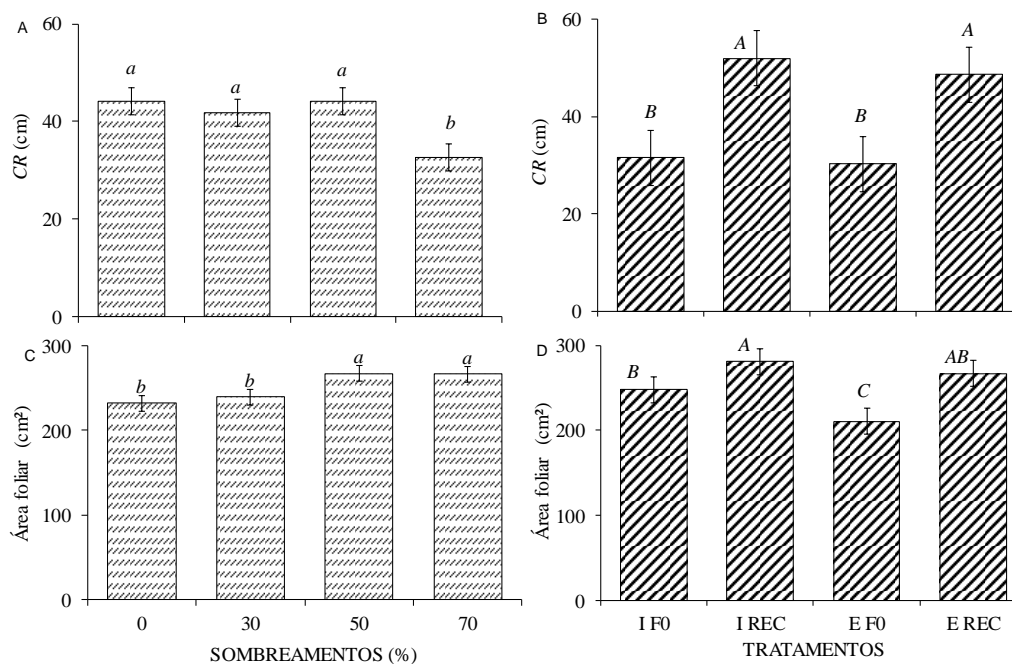


Figura 8. Valores médios do comprimentos de raiz (CR) (A, B) e da Área foliar (AF) (C, D) em mudas de *Hymenaea courbaril* L. sob diferentes Regimes Hídricos+Épocas de Avaliação: Irrigado na Fotossíntese zero (I F0), Estressado na Fotossíntese zero (E F0); Irrigado na Recuperação (I REC), Estressado na Recuperação (E REC) em diferentes sombreamentos: 0% (0), 30% (30), 50% (50) e 70% (70). Letras maiúsculas em itálico comparam os diferentes Regimes Hídricos+Épocas de Avaliação. Letras minúsculas em itálico comparam os diferentes sombreamentos. Médias seguidas de letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ).

A qualidade das mudas (IQD) foi maior nas mudas cultivadas sob 50% e menor nas mudas de 70% (Figura 8A). Para os regimes hídricos e épocas, observamos menor IQD na F0, independente do regime hídrico, entretanto, na REC a maior qualidade foi das mudas IREC (Figura 9B).

O Conteúdo relativo de água nas mudas foi menor sob 0% de sombreamento e E F0, seguidos das mudas nos sombreamentos 30%, entretanto, com a retomada da irrigação na REC, as mudas sob 30% de sombreamento apresentaram aumento do CRA com valores que não variaram das mudas controle, diferente das mudas sob 0% de sombreamento, que embora tenham apresentado aumento do CRA em relação às mudas previamente estressadas, os valores foram estatisticamente menores que os das mudas controle (Figura 9C).

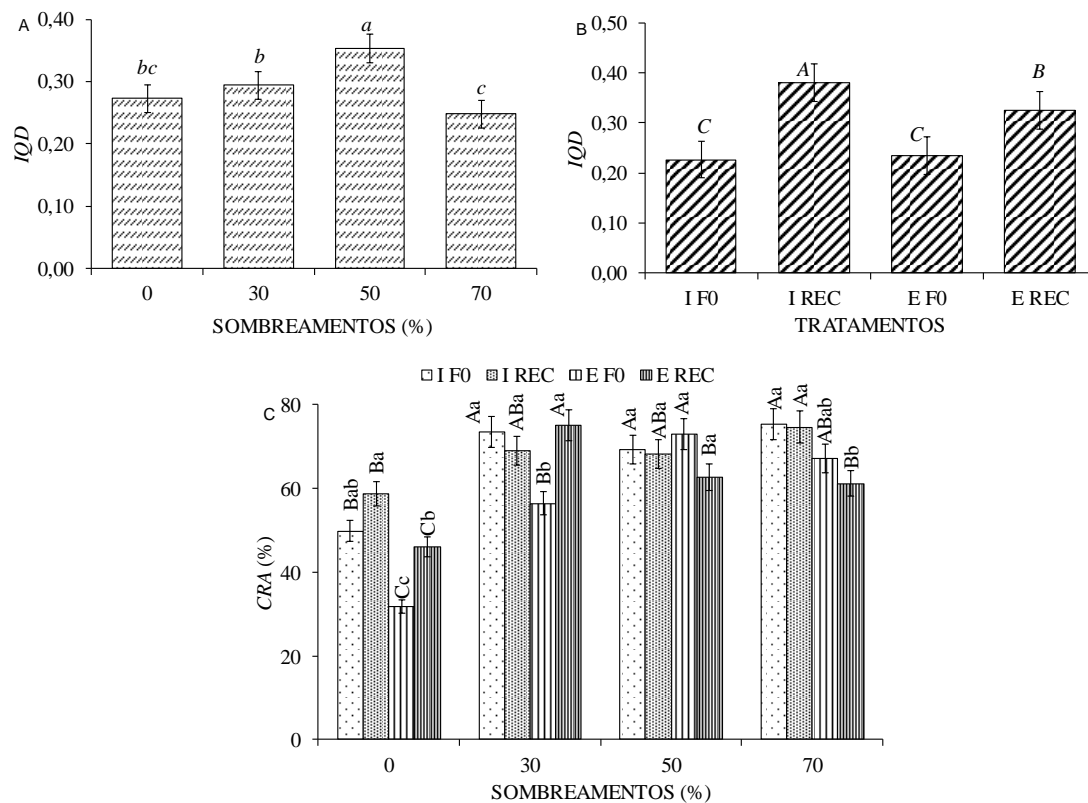


Figura 9. Valores médios do Índice de Qualidade de mudas (IQD) (A, B) e do Conteúdo relativo de água (CRA) (C) em mudas de *Hymenaea courbaril* L. sob diferentes Regimes Hídricos X Épocas de Avaliação: Irrigado na Fotossíntese zero (I F0), Estressado na Fotossíntese zero (E F0); Irrigado na Recuperação (I REC), Estressado na Recuperação (E REC) em diferentes sombreamentos: 0% (0), 30% (30), 50% (50) e 70% (70). Letras maiúsculas em itálico comparam os diferentes Regimes Hídricos+Épocas de Avaliação. Letras minúsculas em itálico comparam os diferentes sombreamentos. Letras maiúsculas comparam o mesmo Regime Hídrico+Época de Avaliação, nos diferentes sombreamentos. Letras minúsculas comparam o mesmo sombreamento nos diferentes Regimes Hídricos+Épocas de Avaliação. Médias seguidas de letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ).

## DISCUSSÃO

O efeito danoso da restrição hídrica sobre as atividades do aparato fotossintético nas mudas de *H. courbaril* era esperado, no entanto, o uso do sombreamento impediu o efeito estressante do déficit hídrico em reduzir  $A$ ,  $G_s$ ,  $A/E_eA/C_i$ ,  $F_v/F_m$  e  $F_v/F_0$  ou o aumento da  $C_i$ ,  $F_0$  e  $F_0/F_m$  das mudas de *H. courbaril* sendo essencial para acelerar a recuperação

dessas características após a retomada da irrigação na REC. Assim, o sombreamento mitigou o estresse e favoreceu a recuperação do metabolismo fotossintético.

As mudas cultivadas sob 50% de sombreamento demorariam mais dias para apresentar a fotossíntese próxima a zero, levando em consideração que no momento da F0, os valores médios das mudas sob 50% eram de  $2,27 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  enquanto nas mudas sob 0, 30 e 70 % apresentaram valores de  $0,31 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,  $1,56 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e  $1,61 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , respectivamente.

Em estudo realizado por Rosa et al. (2021), as mudas de *C. langsdorffii*, independente do sombreamento de cultivo (0, 30 e 70%) só recuperaram seu metabolismo fotossintético em 13 dias e os autores salientaram a demora na recuperação visto que, com outras espécies arbóreas nativas do Cerrado, sob estresse semelhante, este tempo foi menor. Comparando com os resultados de *C. langsdorffii*, para *H. coubaril*, na presente pesquisa, foram semelhantes aos encontrados para outras espécies como por exemplo, *Campomanesia adamantium* (Cambess.) O. Berg (JUNGLOS et al., 2016) e *Hancornias speciosa* Gomes. (SCALONet al., 2015). Cujo metabolismo fotossintético se recuperou em cerca de 4 dias, enquanto *Khaya ivorensis* A. Chev. (ALBUQUERQUE et al., 2013) e *Campomanesia xanthocarpa* Mart. ex O. Berg recuperaram em 7 dias (BENTO et al., 2016) ou variou de 8 a 12 (BARTIERES et al., 2020).

A menor condutância estomática ( $G_s$ ) e eficiência de carboxilação da Rubisco ( $A/C_i$ ) e maior concentração interna de  $\text{CO}_2$  das mudas de *H. coubaril*, sob déficit hídrico e 0% de sombreamento, estão de acordo com informações da literatura nas quais estas mudanças estão relacionadas às variações de umidade do solo devido à irrigação e, na maioria das espécies, as reduções de  $G_s$  associadas ao fechamento estomático, diminuem a perda de água quando expostas à baixa disponibilidade de água e alta insolação e ao mesmo tempo, reduz a atividade da Rubisco (ROSA et al., 2021; CAMPELO et al., 2015, BARTIERES et al., 2020).

Resultados semelhantes foram observados para outras espécies como, por exemplo, *Faguss ylvatica* L. que apresentaram redução da  $G_s$  sob déficit hídrico e alto teor de luminosidade (WANG et al., 2021). Maiores valores de  $C_i$  e menores de  $A/C_i$  foram constatados para *Ormosia arborea* (Vell.) Harmssob 0% de sombreamento (FREITAS et al., 2020), para *Calophyllum brasiliense* Cambes. Sob déficit hídrico (REIS et al., 2018) e para *Myracrodruo nurundeuva* (COSTA et al., 2015). Esses autores sugeriram que o aumento da  $C_i$  seguido de redução de  $A$ , tem sido atribuído à menor eficiência de carboxilação da Rubisco em mudas sob estresse hídrico e luminoso.



Não houve diferença da eficiência instantânea do uso da água ( $A/E$ ) entre os sombreamentos durante a  $F_0$ , no entanto, na  $REC, A/E$  das mudas sob sombreamentos de 0 e 30% aumentou. A manutenção da  $A$  associada a menores valores de taxa de transpiração ( $E$ ) são características de plantas tolerantes a menor disponibilidade de água no solo, o que reflete nas maiores  $A/E$  (MA et al., 2004).

O cultivo das mudas de *H. coubaril* sob 0% de sombreamento e restrição hídrica representam condição estressante para essa espécie, o que pode ser comprovado pelos maiores valores de fluorescência inicial ( $F_0$ ) e  $F_0/F_m$  e menores de  $F_v/F_m$  e  $F_v/F_0$ , sugerindo assim, que tanto a fase bioquímica quanto fotoquímica da fotossíntese, foram prejudicadas por essas condições ambientais.

As avaliações dos parâmetros da fluorescência da clorofila *a* têm sido utilizadas para investigar condições estressantes para as mudas Reis et al. (2020), entretanto, embora existam valores de referência para esses parâmetros, eles podem variar de acordo com a espécie e seu potencial de crescimento e metabolismo (REIS et al., 2020; ROSA et al., 2021). Os valores de referência para  $F_v/F_m$  de 0,75-0,85,  $F_v/F_0$  de 4-6 e 0,14-0,20 para  $F_0/F_m$  representam condição favorável de cultivo, sendo que outros valores, sugerem que a muda está sob condição estressante (BENTO et al., 2016; REIS et al., 2020; ROSA et al., 2021).

Assim, esses parâmetros auxiliaram na identificação da condição estressante, causada pela suspensão da irrigação e o pleno sol, para o cultivo das mudas de *H. coubaril* e foi reforçada pelo comportamento dos outros resultados aqui observados como, por exemplo, as avaliações de carboxilação e condutância estomática, redução do teor de proteína das folhas, aumento da atividade da SOD nas folhas, POX na folha e raiz, e aumento de prolina.

O aumento na atividade das enzimas antioxidantes sob déficit hídrico também foi observado para diversas espécies sob condição estressante como, em *C. xanthocarpa*, *C. fissilis*, *C. langsdorfii*, com respostas que variaram dependendo da enzima (SOD ou POD) e órgão (folha e raiz) (ARAÚJO et al., 2020; BARBOSA et al., 2021; ROSA et al., 2021).

Ferreira et al. (2020) observaram em sua revisão que sob estresse, as plantas induzem um eficiente sistema de defesa antioxidante enzimático e não enzimáticos para evitar danos oxidativos ao combater as Espécies Reativas de Oxigênio (*EROS*), assim as plantas podem produzir e ativar as enzimas antioxidantes e acumular compostos de baixo peso molecular, dentre eles a prolina. Esses compostos desempenham um importante papel de proteção na célula vegetal durante o período em que as plantas estão sob condições de estresse por seca,

além de protegerem contra danos, até mesmo irreversíveis, ao aparelho fotossintético, causados por *EROS* após a seca.

Entretanto, as características de crescimento avaliadas neste trabalho, não foram decisivas para reforçar as necessidades hídricas e luminosas de *H. coubaril*. O comprimento de raiz aumentou em ambas as épocas de recuperação, não variando entre elas, comportamento semelhante ao da área foliar. Ambas características poderiam ser atribuídas ao efeito do tempo entre a retomada da irrigação e a avaliação na REC, o que levou à maior taxa de crescimento, porém, a redução da área foliar na F0, pode ser resultado do efeito danoso do déficit hídrico. Ambas as características apresentaram valores semelhantes ao das mudas controle na REC, indicando potencial de recuperação.

Ressaltamos que a qualidade das mudas sinaliza que *H. coubaril* apresenta crescimento satisfatório sob 50% de sombreamento e que mesmo após o estresse do déficit hídrico, as mudas retomam o crescimento, mas no período avaliado, não houve recuperação total, uma vez que o IQD foi significativamente menor que o das mudas controle. Baseado nas demais características avaliadas, as mudas também poderiam recuperar essa qualidade se as avaliações fossem realizadas em período um pouco mais prolongado.

É evitende que o sombreamento manteve maior hidratação das folhas o que é comprovado pelo maior CRA, mesmo na época de maior estresse como na F0. Os ambientes sombreados tendem a ser mais úmidos, pois a superfície do substrato apresenta menor evaporação da água do solo, o que mantém os estômatos abertos por mais tempo, favorecendo maior assimilação de CO<sub>2</sub> e taxa fotossintética (FREITAS et al., 2020). Entretanto, o sombreamento mais extremo certamente forneceu iluminação insuficiente para as necessidades de crescimento de *H. coubaril*.

Bueno et al. (2021) observaram que o sombreamento não interferiu na altura das mudas de *H. courbaril*, e níveis de sombreamento de 37 e 58%, apresentaram maior área foliar e biomassa, e maior IQD a pleno sol e 37% de sombreamento.

Os resultados do presente estudo corroboram informações da literatura, uma vez que as mudas cultivadas sob sombreamento mais elevado ou maior sombreamento (70%), Bartieres et al. (2020) apresentaram menor crescimento e qualidade, mesmo mantendo alto conteúdo de clorofilas *a,b* e total, alto crescimento de área foliar e conteúdo de água nas folhas.

A elevação das enzimas antioxidantes, do teor de prolina e dos carotenóides, além das alterações da fluorescência da clorofila *a*, sob déficit hídrico e pelo sol, comprovam que essa espécie possui mecanismos de proteção a essas condições estressantes, os quais

conferem plasticidade e potencial de sobrevivência nesta fase de desenvolvimento. Essa plasticidade se deve ao fato dela ser uma espécie generalista, amplamente distribuída na Amazônia, Caatinga, cerrado, Mata Atlântica, e Pantanal (Pinto et al., 2022).

Segundo Pagliarini et al. (2017) as melhores mudas são obtidas sob tela de sombreamento de 30 e 50%. Entretanto, o excesso de luz também é prejudicial na fase de mudas. As mudas de *H. coubaril* sob pleno sol apresentou respostas de planta pioneira, como aumento de carotenóides e alteração no fotossistema II (FSII), porém com baixa atividade da Rubisco.

Diante do exposto e observado em nosso trabalho, semelhante ao observado na literatura, também acreditamos que essa espécie tem grande potencial para ser utilizada em projetos de recuperação e enriquecimento de áreas degradadas, sujeitas a períodos de deficiência hídrica, uma vez que apresentam capacidade de recuperar seu metabolismo fotossintético e retomar seu crescimento, mas que o cultivo sombreado minimiza o efeito estressante do déficit hídrico e favorece a recuperação das mudas.

## **CONCLUSÃO**

Os sombreamentos intermediário de 30 e 50 % mitigam o déficit hídrico e aceleram a recuperação de mudas de *H. coubaril*.

Quando sombreadas e re-irrigadas as mudas previamente estressadas, podem recuperar seu metabolismo fotossintético sem alterações e /ou danos permanentes na eficiência do fotossistema II, com retomada do crescimento e qualidade das mudas.

O déficit de água associado ao cultivo sem sombreamento não deve ser adotado no cultivo ou transplante de mudas de *H. coubaril*.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ALBUQUERQUE, M. P. F.; MORAES, F. K. C.; SANTOS, R. I. N.; CASTRO, G. L. S.; RAMOS, E. M. L. S.; PINHEIRO, H. A. Ecofisiologia de plantas jovens de mogno-africano submetidas a déficit hídrico e reidratação. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.48, p.9-16. 2013.

ARAÚJO, L. F. B.; SCALON, S.; DRESCH, D. M.; JUNGLOS, F. S.; MUSSURY, R. M.; JUNGLOS, M. S. Water deficit alters morpho-anatomical and antioxidant responses in

seedlings of *Campomanesia xanthocarpa* enabling their recovery. *International Journal of Agriculture and Biology*, v. 24, n. 6, p. 1431-1438, 2020.

ARNON, D. I. Copper enzymes in isolated chloroplasts: polyphenoloxidases in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, v. 24, n. 1, p. 1-15, 1949.

BARBOSA, L. O.; DRESCH, D. M.; SCALON, L. Q.; SCALON, S. P. Q. Ecophysiological Strategies of *Cedrela fissilis* Vell. Seedlings under Conditions of Flooding and Light Availability. *Journal of Sustainable Forestry*, p.1-16, 2021.

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. *NotulaeBotanicaeHortiAgrobotaniciCluj-Napoca*,v. 48, p. 234-244, 2020.

BENTO, L. F.; SCALON, S. P. Q.; DRESCH, D. M.; PEREIRA, Z. V. Potential for recovery of *Campomanesia xanthocarpa* Mart. ex O. Berg seedlings from water deficit. *African Journal of Agricultural Research*, v.11, p. 2775-2785, 2016.

BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analyticalbiochemistry*, v. 72, p. 248, 1976.

BROETTO, F. *Métodos de trabalho em bioquímica vegetal e tecnologia de enzimas*. Botucatu: IBB, Cultura. Acadêmica, UNESP, São Paulo, 2014. 92p

BUENO, M. M.; LELES, P. S. S.; PINTO, M. F.; RESENDE, A. S.; COUTO, B. R. M.; CARVALHO, D. F. Water use in the growth of atlantic forest tree species seedlings under different shading levels. *Ciência e Agrotecnologia*, v.45, p.220, 2021.

CAMPELO, D. H.; LACERDA, C. F.; SOUSA, J. A.; CORREIA, D.; BEZERRA, A. M. E.; ARAÚJO, J. D. M.; NEVES, A. L. R. Leaf gas exchange and efficiency of photosystem II in adult plants of six forest species as function of the water supply in the soil. *RevistaÁrvore*, v. 39, p.973-983, 2015.

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 (*Hymenaeastigonocarpa*) plants. *Photosynthetica*, v.53, p. 118-127. 2015.

COSTA, C. D.; DIARIS, K. B.; GUIMARÃES, T. M. Métodos de escarificação para superação de dormência de sementes de jatobá. *Revista científica eletrônica de Engenharia Florestal*, v. 30, p. 44-52, 2017.

COSTA, E. N.; MARTINS, L. O.; REIS, L. C.; FERNANDES, M. G. SCALON, S. P. Q. Resistance of Cowpea Genotype to *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) and Its Relationship to Resistance-Related Enzymes. *Journal of Economic Entomology*, v. 113, p. 2521-2529, 2020.

CREMON, T.; SCALON, S. P. Q.; ROSA, D. B. C. J.; DRESCH, D. M. How does *Copaifera langsdorffii* respond to flooding under different irradiance levels?. *Plant Biosystems*, p.1-11, 2020.

DIANAT, M.; SAHARKHIZ, M. J.; TAVASSOLIAN, I. Salicylic acid mitigates drought stress in *Lippia citriodora* L.: Effects on biochemical traits and essential oil yield. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, v. 8, p. 286-293, 2016.

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

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

FERREIRA, R. A.; BORELLA, J.; HÜTHER, C. M.; DO CANTO, A. C. B.; CORREA, N. P. C.; CORREIA, D. M.; PEREIRA, C. R. Drought-induced stress in leaves of *Coix lacryma-jobi* L. under exogenous application of proline and GABA amino acids. *Brazilian Journal of Botany*, v.43, p. 513–521, 2020.

FREITAS, V. M. B.; SCALON, S. P. Q.; DRESCH, D. M.; BASTOS, S. S.; SOUZA, A. P.; JUNGLOS, F. S. Emergence, initial growth and photosynthetic metabolism of *Ormosia arborea* (Vell.) harms under different light availabilities. *Floresta*, v. 50, p.1689-1697, 2020.

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 on gas exchanges in *Hymenaea courbaril* L. (Fabaceae) seedlings subjected to water deficit. *Floresta*, v. 48, p. 163-172, 2018.

JUNGLOS, F. S.; JUNGLOS, M. S.; DRESCH, D. M.; PEREIRA, N. S.; KODAMA, F. M.; SCALON, S. P. Q. Recovery of the photosynthetic capacity of *Campomanesia adamantium* (Myrtaceae) after water déficit. *Brazilian Journal of Botany*, v.39, p. 541-546, 2016.

JUNIOR, B. É.; ROSSIELLO, R. O. P.; MORENZ, M. J. F.; RIBEIRO, R. C. Comparação de métodos diretos de extração e quantificação dos teores de clorofilas em folhas do capim-Tifton 85. *Ciência Rural*, v. 40, p. 633-636, 2010.

MA, C. C.; GAO, Y. B.; GUO, H. Y.; WANG, J. L. Photosynthesis, transpiration and water use efficiency of *Caragana microphylla*, *C. intermedia* and *C. korshinskii*. *Photosynthetica*, v. 42, p. 65-70, 2004.

NASCIMENTO, H. H. C.; NOGUEIRA, R. J. M. C.; SILVA, E. C.; SILVA, M. A. Análise do crescimento de mudas de jatobá (*Hymenaea courbaril* L.) em diferentes níveis de água no solo. *Revista Árvore*, v. 35, p. 617-626. 2011.

NASCIMENTO, H. H. C.; SANTOS, C. A.; FREIRE, C. S.; SILVA, M. A.; NOGUEIRA, R. J. M. C. Ajustamento osmótico em mudas de jatobá submetidas à salinidade em meio hidropônico. *Revista Árvore*, v. 39, p. 641–653, 2015.

OLIVEIRA, W. L.; MEDEIROS, M. B.; MOSER, P.; PINHEIRO, R.; OLSEN, L. B. Regeneração e estrutura populacional de jatobá-da-mata (*Hymenaea courbaril* L.), em dois fragmentos com diferentes graus de perturbação antrópica. *Acta Botanica Brasilica*, v. 25, p. 876-884, 2011.

ORTIZ, D.; MORENO, F.; DÍEZ, M. C. Photosynthesis, growth, and survival in seedlings of four tropical fruit-tree species under intense radiation. *Acta Amazonica*, v.51, p. 1-9, 2021.

PAGLIARINI, M. K.; MOREIRA, E. R.; NASSER, F. A. D. C. M.; DE MENDONÇA, V. Z.; DE CASTILHO, R. M. M. Níveis de sombreamento no desenvolvimento de mudas de *Hymenaea courbaril* var. *Stilbocarpa*. *Cultura Agronômica*, v. 26, p. 330-346, 2017.

PINTO, R. B.; TOZZI, A. M. G. A.; MANSANO, V. F. 2020. *Hymenaea* in *Flora do Brasil 2020*. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB22972>>. Acesso em: 09 fev. 2022.

PORTELA, F. C. S.; MACIEIRA, B. P. B.; ZANETTI, L. V.; GAMA, V. N.; SILVA, D. M.; MILANEZ, C. R. D.; CUZZUOL, G. R. F. How does

*Carinianaestrellensis* respond to different irradiance levels? *Journal of Forestry Research*, v. 301, p. 31-44, 2019.

REIS, L. C.; FORESTI, A.; SCALON, S. P. Q.; DRESCH, D. M.; PEREIRA, Z. V. Effect of water deficit and abscisic acid on photosynthetic and antioxidant metabolism in seedlings of *Calophyllum brasiliense* (Cambess.). *CERNE*, v. 24, p. 387-396, 2018.

REIS, L. C.; SCALON, S. P.; DRESCH, D.; 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 Cluj-Napoca*, v. 48, p. 210-220, 2020.

ROSA, D. B. C. J.; SCALON, S. P. Q.; DRESCH, D. M. Shading for water stress mitigation in *Copaifera langsdorffii* Desf. Seedlings. *South African Journal of Botany*, v. 140, p. 240-248, 2021.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; DOS ANJOS, L. H. C.; DE OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; CUNHA, T. J. F. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília, DF: Embrapa, 2018., 2018.

SCALON, S. P. Q.; KODAMA, F. M.; DRESCH, D. M.; MUSSURY, R. M.; PEREIRA, Z. V. Gas exchange and photosynthetic activity in *Hancornia speciosa* Gomes seedlings under water deficit conditions and during rehydration. *Bioscience Journal*, v. 31, p. 1124-1132, 2015.

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

SOUSA, D. D. C. V. D.; BESSA, L. A.; SILVA, F. G.; ROSA, M.; VASCONCELOS FILHO, S. D. C.; VITORINO, L. C. Morpho-Anatomical and Physiological Responses Can Predict the Ideal Period for the Transplantation of Hydroponic Seedlings of *Hymenaea courbaril*, a Neotropical Fruit Tree. *Plants*, v. 9, p. 721, 2020.

SOUZA, C. C.; OLIVEIRA, F. A.; SILVA, I. F.; AMORIM NETO, M. S. Avaliação de métodos de determinação de água disponível e manejo da irrigação em terra roxa sob cultivo de algodoeiro herbáceo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 4, p. 338-342, 2000.

WANG, F.; ISRAEL, D.; RAMÍREZ-VALIENTE, J. A.; SÁNCHEZ-GÓMEZ, D.; ARANDA, I.; APHALO, P. J.; ROBSON, T. M. Seedlings from marginal and core populations of European beech (*Fagus sylvatica* L.) respond differently to imposed drought and shade. *Trees*, v. 35, [ p. 53-67, 2021.

YANG, Y. J.; LIU, T.; ZHANG, S. B.; HUANG, W. Photoinhibition of oxygen-evolving complex and photosystem II at chilling stress in the tropical tree species *Dalbergia odorifera*. *Photosynthetica*, v. 58. p. 245-252, 2020.



## **Capítulo II. SILICATO DE POTÁSSIO ALIVIA O DÉFICIT HÍDRICO E O POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO DE MUDAS DE *Hymenaea courbaril* L.**

**Resumo-**A baixa disponibilidade hídrica no solo pode ser fator limitante ao metabolismo e crescimento de espécies nativas e frutíferas do Cerrado. Assim, o uso de tecnologias que possam aliviar o estresse torna-se cada vez mais estudado. Objetivou-se avaliar o efeito e potencial do silicato de potássio em aliviar o estresse e auxiliar na recuperação de mudas de *Hymenaea courbaril* L. submetidas ao déficit hídrico. As mudas receberam cinco doses de silicato de potássio ( $K_2SiO_3$ ) via foliar: 0,0; 3,0; 6,0; 9,0; e 12,0 mL L<sup>-1</sup>, e posteriormente foram submetidas a dois regimes hídricos: I: irrigação diária e E: estressada devido a suspensão da irrigação. As avaliações das características fisiológicas, de crescimento, e da atividade de enzimas antioxidantes foram realizadas em dois períodos: F0= fotossíntese próximo a zero de algum tratamento e REC= recuperação, retomada da irrigação até que as mudas apresentassem valores de fotossíntese próximo as mudas irrigadas. Os dados foram comparadas pelo teste de Tukey, para a combinação de regimes hídricos e épocas de avaliação, e análise de regressão para as doses de silicato de potássio. As mudas de *H. courbaril* apresentaram sensibilidade ao déficit hídrico, com redução das trocas gasosas, fluorescência da clorofila *a*, crescimento e índice de qualidade. A aplicação de  $K_2SiO_3$  na dose próxima de 6,00 mL L<sup>-1</sup> mitigou o efeito estressante sobre o aparato fotossintético e auxiliou na recuperação morfofisiológica das mudas. Observamos aumento da atividade da superóxido dismutase, peroxidase e redução de proteínas nas folhas e raízes com a aplicação de  $K_2SiO_3$ . *H. courbaril* apresenta resiliência por plasticidade fisiológica. A aplicação de silicato de potássio na dose entre 6,00-7,00 mL L<sup>-1</sup> contribui no aumento de enzimas antioxidantes, que auxiliaram na mitigação do efeito estressante do déficit hídrico e favoreceu a recuperação.

Palavras-chave: silício, resiliência, plasticidade fisiológica, estresse hídrico, enzimas antioxidantes.

### **Chapter II. POTASSIUM SILICATE RELIEVES THE WATER DEFICIT AND RECOVERY POTENTIAL OF SEEDLINGS OF *Hymenaea courbaril* L.**

**Abstract-** The low water availability in the soil can be a limiting factor to the metabolism and growth of native and fruit-bearing species of the Cerrado. Thus, the use of technologies that can relieve stress becomes more studied. The objective was to evaluate the potential

effect of potassium silicate and relieve stress and aid in the recovery of *H. Courbaril*. under water deficit. The seedlings received five doses of potassium silicate ( $K_2SiO_3$ ) via foliar: 0.0; 3.0; 6.0; 9.0; and 12.0 mL L<sup>-1</sup>, being subsequently separated into two water regimes: I: daily irrigation and E: stressed due to irrigation suspension. The physiological characteristics, growth and activity of antioxidant enzymes were performed in two periods: P0= close to zero photosynthesis of some treatment and REC= recovery, irrigation resumption until the seedlings present photosynthesis values close to the irrigated seedlings. Data were prepared by Tukey's test for a period of water regimes and assessment times, and regressão analysis for potassium silicate doses. The seedlings of *H. Courbaril* sensitivity to water deficit, with reduced gas exchange, chlorophyll fluorescence *a*, growth and quality index. The application of  $K_2SiO_3$  in a dose close to 6.00 mL L<sup>-1</sup> mitigated the stressful effect on the photosynthetic apparatus and helped in the morphophysiological recovery of the seedlings. We observed increased activity of superoxide dismutase, peroxidase and reduced protein in leaves and roots with the application of  $K_2SiO_3$ . *H. courbaril* shows resilience due to physiological plasticity. The application of potassium silicate at a dose between 6.00-7.00 mL L<sup>-1</sup> contributes to the increase of antioxidant enzymes, that helped to mitigate the stressful effect of water deficit and favored recovery.

**Keywords:** silicon, resilience, physiological plasticity, water stress, antioxidant enzymes.

## INTRODUÇÃO

A biodiversidade em áreas de florestas naturais tem sofrido grande impacto negativo do desmatamento que vem ocorrendo de maneira acentuada (MONTIBELLER et al., 2020), sendo o Cerrado um dos domínios brasileiros mais antropizados e ameaçados pela atividade humana (BEUCHLE et al., 2015; MORANDI et al., 2020).

Além disso, as mudanças climáticas também exacerbaram a incidência e a gravidade de diversos estresses abióticos, entre as quais o estresse hídrico (TESHOME et al., 2020). Em muitas partes do mundo, a precipitação tornou-se menos previsível, mais intensa e, devido ao aumento das temperaturas, sujeita a maior evapotranspiração (MAKORE et al., 2021). Nesse sentido, muitas áreas estão sujeitas a condições adversas, tal como a restrição hídrica, tornando-se imprescindível o estudo de tecnologias que possam auxiliar na obtenção de mudas de elevada qualidade.

O uso do silicato de potássio ( $K_2SiO_3$ ) tem sido promissor, pois em sua composição contém silício e potássio, elementos benéfico e essencial, respectivamente, que auxiliam

tanto na nutrição, bem como por amenizar os efeitos negativos causados por diferentes estresses (ETASAMI e JONG, 2018; VERMA et al., 2020). O seu uso pode fornecer uma maneira eficaz de melhorar o desempenho de plantas submetidas ao estresse hídrico (RAJIV et al., 2020).

A melhoria da resistência à falta de água do Si também pode ser atribuída a fortes habilidades de extrair água do solo como consequência da promoção do alongamento da raiz (HATTORI et al., 2008) e da regulação positiva dos genes da aquaporina (LIU et al., 2015). O potássio exerce importante papel no metabolismo fotossintético, pois está associado ao ajuste osmótico e regulação da turgescência da planta, além de outros processos devido a sua participação na nutrição das plantas (AHANGER et al., 2017; BARRAGAN et al., 2021).

A fotossíntese em plantas é sensível a estresses ambientais (GUPTA e HUANG, 2014). No entanto, a aplicação de silicatos aumentou a capacidade fotossintética em várias plantas submetidas a estresses abióticos (VERMA et al., 2019; LIU et al., 2015).

Um ponto importante para a recomposição da biodiversidade do Cerrado é o estudo sobre o crescimento inicial de espécies com alto valor ambiental, assim como estudos com tecnologias que podem aumentar a qualidade das mudas em reduzir o consumo de água, bem como facilitar a realização de projetos de recuperação de áreas degradadas.

Dentre as espécies potenciais para plantio, encontra-se o jatobazeiro (*Hymenaea courbaril* L.), uma espécie amplamente distribuída na região Neotropical, tolerante a diferentes condições ambientais (NASCIMENTO et al., 2011). É uma espécie arbórea pertencente à família Fabaceae com distribuição em toda a América Latina. Devido à presença de uma polpa enfarinhada que envolve seu embrião (BUSATTO et al., 2013), a espécie é um importante recurso alimentar para a fauna, que dispersa suas sementes. Tal fato reforça a importância da preservação e realização de plantios da espécie em áreas degradadas destinadas à recomposição da vegetação arbórea (LIMA; ZANELLA; CASTRO, 2010) ou em sistemas agroflorestais.

Conhecer a capacidade das mudas de *H. courbaril* de se aclimatar ao déficit hídrico e o efeito da aplicação do silicato de potássio na mitigação do estresse torna-se relevante para garantir o sucesso da implantação futura de projetos para recuperação de áreas degradadas, enriquecimento dessas áreas ou plantio para exploração sustentável. Assim, considerando a hipótese de que o silicato de potássio pode mitigar o efeito estressante do déficit hídrico sobre o metabolismo fotossintético, antioxidante e crescimento de mudas objetivou avaliar

as respostas das mudas de *H. courbaril* cultivadas sob déficit hídrico com doses de silicato de potássio e seu potencial de recuperação após a retomada da irrigação.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Local de desenvolvimento**

O experimento foi realizado em viveiro de 50% de sombreamento com proteção adicional superior e lateral de cobertura plástica para evitar precipitações pluviométricas, na Faculdade de Ciências Agrárias (22°11'43.7"S e 54°56'08.5"W, 452 m), da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), em Dourados – MS, Brasil.

### **Coleta dos frutos e produção das mudas**

As mudas de *Hymenaea courbaril* L. utilizadas para os experimentos foram produzidas a partir de frutos coletados na região da Grande Dourados em árvore que estava em meio a fragmentos florestais em de janeiro de 2020. Afim de manter a padronização genética das mudas, os frutos foram coletados apenas de uma matriz. Após a coleta dos frutos foi realizado a extração, seleção e limpeza das sementes, as quais foram escarificadas mecanicamente conforme Costa et al. (2017), para facilitar a embebição de água, acelerando a germinação.

A sementeira foi realizada no dia 05/01/2020, em viveiro com tela de sombrite de 50% em bandeja de 125 células com substrato comercial a emergência total ocorreu 15 dias, após a sementeira (DAS) e o transplante para vasos de 7 litros aos 30 DAS. Os vasos foram previamente preenchidos com Latossolo Vermelho distroférrico (SANTOS et al., 2018) + areia grossa (3:1, v/v) permanecendo com irrigações diárias de 75% da capacidade de retenção de água por 40 dias, momento em que as mudas apresentaram altura média de 24 cm e foi realizado o início do experimento, com suspensão da irrigação e aplicação das concentrações de  $K_2SiO_3$ .

### **Delineamento experimental**

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, sendo os tratamentos arranjos em esquema de parcela subdividida, em que foi alocada nas parcelas a combinação entre regimes hídricos + períodos de avaliação e nas subparcelas doses de  $K_2SiO_3$ , com três repetições. Cada unidade experimental foi constituída por um vaso com duas mudas cada.

### **Tratamentos**

As mudas receberam aplicação de cinco doses de silicato de potássio ( $K_2SiO_3$  – 12% Si e 15%  $K_2O$ ; densidade:  $1,40\text{ g L}^{-1}$ ): 0,0; 3,0; 6,0; 9,0; e  $12,0\text{ mL L}^{-1}$  de acordo com pré-testes realizados. A aplicação foi realizada no período matutino via pulverização foliar, na face abaxial e adaxial até ponto de gotejamento (10 mL por muda), no dia 17/03/2020. Na solução, adicionou-se 2,0 mL de adjuvante LI700 para facilitar a aderência do produto à folha.

As mudas foram separadas em quatro grupos baseando-se nos seguintes regimes hídricos: Irrigação contínua – I: manutenção de 75% da capacidade de retenção de água no substrato por meio do método gravimétrico (SOUZA et al., 2000) e Déficit hídrico – E, caracterizado pela suspensão da irrigação. Os regimes hídricos foram associados aos seguintes tempos de avaliação: F0 – quando a taxa fotossintética das mudas submetidas à suspensão da irrigação alcançou valores próximos a zero; REC – realizou-se a retomada da irrigação até que a taxa fotossintética das mudas previamente submetidas a restrição hídrica atingisse valores próximos ao das plantas controle. Assim os tratamentos foram os seguintes: Irrigado na Fotossíntese zero (FOI), Estressado na Fotossíntese zero (FOE); Irrigado na Recuperação (RECI), Estressado na Recuperação (RECE). A fotossíntese zero foi determinada quando as mudas de algum dos tratamentos atingissem valor próximo a zero. O período de recuperação foi considerado quando as mudas cultivadas com cada dose de silicato de potássio atingissem valores de  $A$  próximo ao das mudas irrigadas diariamente (Figura 1a).

### **Temperatura do ambiente de cultivo e folhas e umidade relativa**

Os dados de temperatura do ambiente de cultivo e umidade relativa foram determinados utilizando termo-higrômetro, e a temperatura foliar foi determinada com IRGA - LCIPro- SD ADC BioScientific Ltd., e encontram-se na (Figura 2).

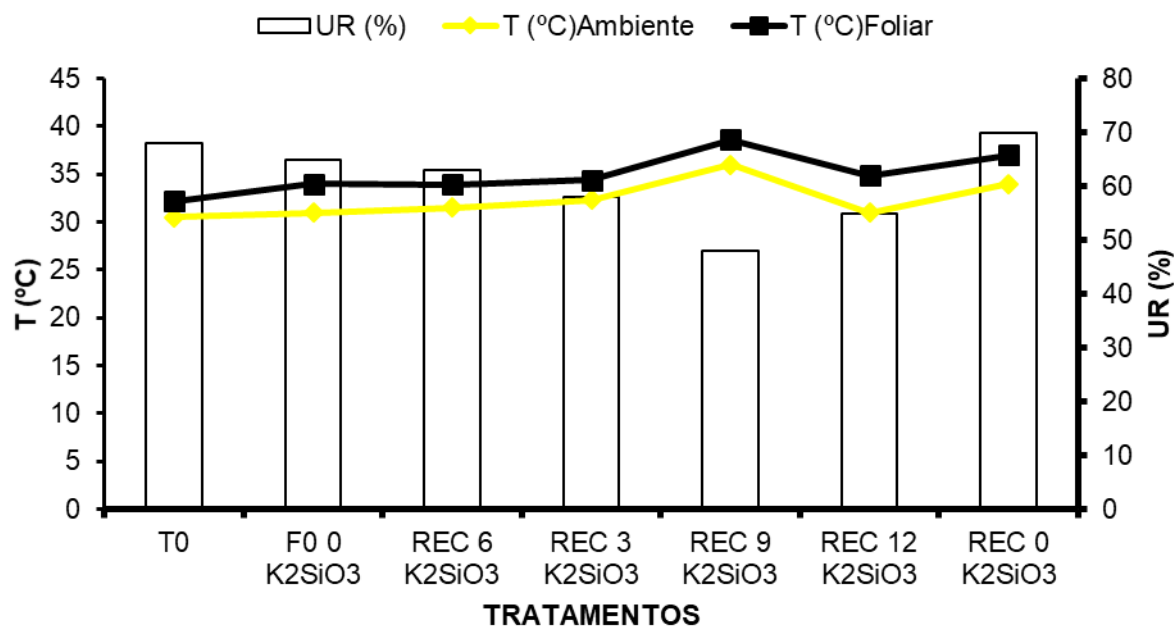


Figura 2. Temperatura do ambiente, temperatura foliar e umidade relativa durante os períodos de avaliações. UFGD, Dourados – MS, 2021.

### Características avaliadas:

#### Trocas gasosas

Com auxílio do medidor portátil de fotossíntese LCIPro- SD ADC BioScientific Ltd., foram avaliados a taxa fotossintética ( $A$  -  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), condutância estomática ( $G_s$  -  $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), concentração intercelular de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$  -  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ); além da eficiência de carboxilação da Rubisco ( $A/C_i$ ), eficiência no uso da água ( $A/E$ ).

Os teores de clorofila “a”, “b”, total ( $\mu\text{g cm}^2$ ) e carotenoides ( $\mu\text{g cm}^2$ ) foram quantificados, coletando-se uma lâmina foliar totalmente expandida por planta. Foi pesado 1 g, macerando-se com pistilo em almofariz, em 8 mL de acetona a 80%, conforme (Junior et al., 2010). Posteriormente, as soluções foram levadas para centrifugação utilizando microcentrífuga (MCD-200, H. T.) à velocidade de 1.500 rpm, durante 10 minutos. Em seguida, realizou-se a leitura da absorbância nos comprimentos de onda de 470, 645 e 663 nm, utilizando-se espectrofotômetro (SP-220, Biospectro). As concentrações dos teores de clorofilas e carotenoides foram calculadas de acordo com as propostas de Arnon (1949) e Lichtenthaler e Buschman (2001), respectivamente

#### A fluorescência da clorofila a:

Avaliada a eficiência quântica potencial do fotossistema II ( $F_v/F_m$ ) utilizando fluorômetro portátil modelo OS-30p (Opti-Sciences Chlorophyll Fluorometer, Hudson, USA) e a partir das medidas de fluorescência inicial ( $F_0$ ), fluorescência máxima ( $F_m$ ) foram

calculados a eficiência efetiva da conversão de energia absorvida ( $F_v/F_0$ ) e a produção quântica basal dos processos não fotoquímicos no FSII ( $F_0/F_m$ ).

As determinações da fluorescência e das trocas gasosas foram realizadas entre 8:00 e 11:00 horas da manhã, nas mesmas folhas do segundo par de folhas totalmente expandidas. Para a fluorescência, as folhas foram submetidas a um período de 30 minutos de adaptação ao escuro com o auxílio de cliques adaptadores, para que todos os centros de reação nessa região foliar adquirissem a condição de “aberto”, ou seja, oxidação completa do sistema fotossintético de transporte de elétrons.

### **Proteínas totais em folhas (mg)**

Realizada por meio da determinação quantitativa pelo método de Bradford (1976), sendo que no preparo do extrato foram utilizadas material fresco congelados em nitrogênio líquido. As leituras de absorbância foram realizadas em triplicatas no comprimento de onda de 595nm. Sendo a proteína (PROT) expressa em mg de proteína por g de MF<sup>-1</sup>.

### **Atividade das enzimas antioxidantes**

- Atividade de enzimas antioxidantes: avaliada nas folhas e raízes de cada tratamento utilizando tecidos congelados em nitrogênio líquido. Uma quantidade de 1 g de cada amostra foi pesada e macerada em uma solução de 6 mL contendo 0,3 g de polivinilpirrolidona (PVP) diluída em 100 mL de tampão fosfato de potássio (0,2 M)(COSTA et al., 2020). Posteriormente, as amostras foram centrifugadas a 4000 rpm por 10 minutos e o sobrenadante foi usado como um extrato enzimático para determinar a superóxido dismutase (SOD,  $\mu\text{g MF}^{-1}$ ) e a atividade da peroxidase (POD,  $\mu\text{mol mg}^{-1} \text{ proteína min}^{-1}$ ), de acordo com Broetto (2014).

### **O Conteúdo relativo de água nas folhas (CRA),**

Foi determinado em quatro folhas de cada tratamento, segundo a expressão matemática:

$$CRA = 100 \times \frac{(Massa\ fresca - Massa\ seca)}{(Massa\ saturada - Massa\ seca)}$$

As folhas foram coletadas entre 7:00 e 10:00 horas da manhã e cortadas com cilindros de área conhecida. Após pesagem da massa fresca, foram colocados em placas de petri com água destilada por 24 h para saturação. Após pesagem dos discos saturados eles foram secos para determinação da massa seca.

### **Crescimento:**

Comprimentos **de raiz**, medidos com auxílio de uma régua graduada em centímetros (cm) e os resultados expressos em centímetros. **Área foliar** medida com auxílio do aparelho Li 3100 – Area Meter e os resultados expressos em cm<sup>2</sup>. altura da parte aérea (PA), do diâmetro do coleto (D), massa seca total (PMST) que é dado pela soma da massa seca da parte aérea (PMSPA) e das raízes (PMSR), a secagem foi realizada em estufa de circulação forçada de ar, regulada a 70°C ± 2 °C por 72 horas e mensurados com auxílio de uma balança analítica de precisão (0,0001g).

**Qualidade das mudas:** foi determinado utilizando o Índice de Qualidade de Mudanças Dickson et al. (1960) em função da seguinte equação.

$$IQD = \frac{PMST}{\left(\frac{PA}{D}\right) + \left(\frac{PMSPA}{PMSR}\right)}$$

### **Análises estatísticas**

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), e quando significativos pelo teste F ( $p < 0,05$ ) as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, para a combinação de regimes hídricos e épocas de avaliação, e pelo teste de regressão ( $p < 0,05$ ) para as doses de silicato de potássio, utilizando o *software* SISVAR (FERREIRA, 2019).

## **RESULTADOS**

### **Resumo da análise de variância**

De acordo com a análise de variância, as variáveis que apresentaram diferenças significativas para a relação dupla Períodos de avaliação X Doses de silicato de potássio foram, Fotossíntese – *A*, eficiência de carboxilação da RuBisCO – *A/Ci*, eficiência do uso da água – *EUA*, transpiração – *E*, índice de qualidade de Dickson – *IQD*, Proteína nas folhas e raízes – *POT*, enzima superóxido dismutase nas folhas e raízes – *SOD* e na enzima peroxidase na folha – *POX*.

A concentração interna de CO<sub>2</sub> – *Ci* e o teor de carotenóides apresentaram diferenças significativas apenas pelo fator isolado Períodos de avaliação. As variáveis, *F0*, *Fv/Fm*, *Fv/F0*, *F0/Fm*, Clorofila total, conteúdo relativo de água na folha – *CRA* e área foliar – *AF* apresentaram diferenças significativas para os dois fatores isolados.

### **Esquema gráfico da Recuperação**



A recuperação dos tratamentos, após a fotossíntese zero ocorreu em dias diferentes, levando a diferentes tempos de recuperação sendo 9, 7, 5,3 e 2 dias, para as respectivas doses de  $K_2SiO_3$  sendo 0, 12, 9, 3, 6mL L<sup>-1</sup> conforme Figura 2.

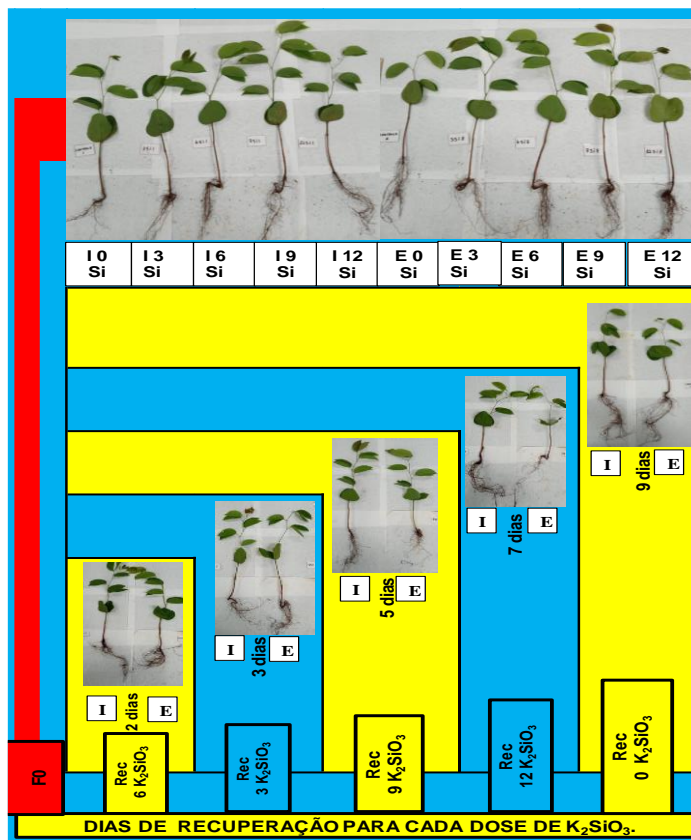


Figura 2. Avaliação da recuperação das mudas em cada regime hídrico e sombreamento após a reirrigação. Fotossíntese zero- F0. Déficit hídrico- E, irrigação contínua- I. irrigação contínua com 0 mL L<sup>-1</sup>K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>(I0 Si), irrigação contínua com 3 mL L<sup>-1</sup>K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>(I3 Si), irrigação contínua com 6 mL L<sup>-1</sup>K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>(I6 Si), irrigação contínua com 9 mL L<sup>-1</sup>K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>(I9 Si), irrigação contínua com 12 mL L<sup>-1</sup>K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>(I12 Si). Déficit hídrico com 0 mL L<sup>-1</sup>K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>(E0 Si), déficit hídrico com 3 mL L<sup>-1</sup>K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>(E3 Si), déficit hídrico com 6 mL L<sup>-1</sup>K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>(E6 Si), déficit hídrico com 9 mL L<sup>-1</sup>K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>(E9 Si), déficit hídrico com 12 mL L<sup>-1</sup>K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>(E12 Si). UFGD, Reis, 2021. Dourados – MS.

### Trocas gasosas

As mudas de *H. courbaril* foram afetadas negativamente pela restrição hídrica, sendo que a taxa fotossintética ( $A$ ) apresentou valor próximo a zero aos 13 dias. Em geral, as trocas gasosas foram influenciadas pela interação entre as doses de silicato de potássio ( $K_2SiO_3$ ) e dos regimes hídricos nos diferentes períodos de avaliação (Figura 2).

As mudas na F0 E tiveram redução da  $A$  ( $0,39 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), mas a aplicação de  $6,23 \text{ mL de } K_2SiO_3 \text{ L}^{-1}$  promoveu maiores valores ( $2,67 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) (Figura 3a).

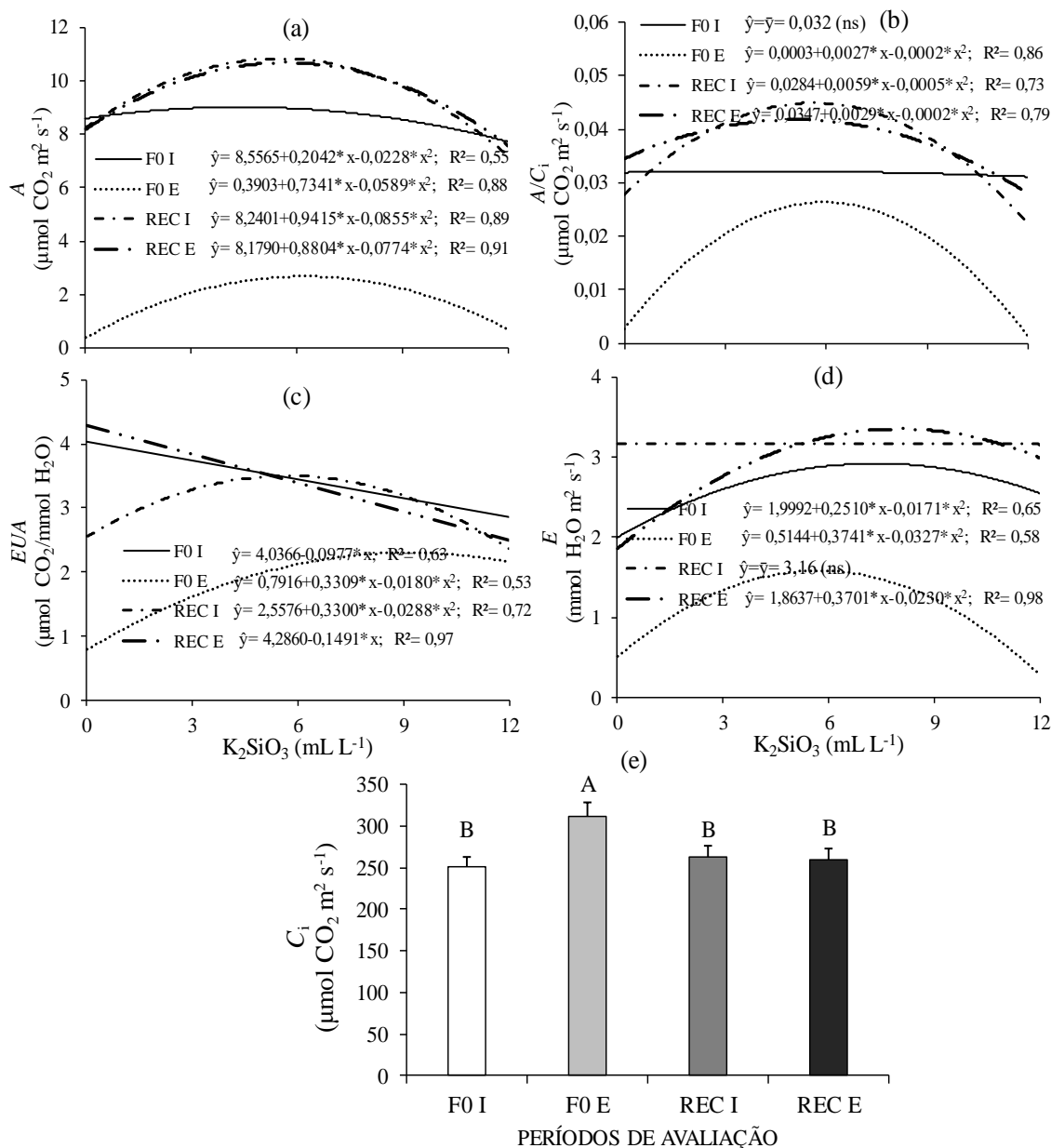


Figura 3. Fotossíntese –  $A$  (a), eficiência de carboxilação da RuBisCO –  $A/C_i$  (b), eficiência do uso da água –  $EUA$  (c), transpiração –  $E$  (d) e concentração intercelular de  $\text{CO}_2$  -  $C_i$  (e) em folhas de *H. courbaril* cultivadas com doses de silicato de potássio ( $K_2SiO_3$ ). UFGD – Dourados – MS, 2021. Letras iguais entre colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). \* ( $p < 0,05$ ); ns= não significativo ( $p > 0,05$ )

Na REC, todas as mudas tiveram aumento da  $A$ , especialmente aquelas cultivadas com dose entre 5,50-6,20 mL de  $K_2SiO_3 L^{-1}$ .

A eficiência intrínseca de carboxilação da RuBisCO ( $A/C_i$ ) reduziu de maneira acentuada na F0 E, entretanto, a aplicação de 6,75 mL de  $K_2SiO_3 L^{-1}$  proporcionou valores mais elevados (Figura 3b). Na REC, as mudas previamente estressadas tiveram aumento de  $A/C_i$ , semelhante as irrigadas diariamente.

Quando cultivadas sob F0 E, as mudas apresentaram menores valores ( $0,89 \mu mol CO_2 / mmol H_2O m^2 s^{-1}$ )  $EUA$  quando cultivadassem  $K_2SiO_3$ , e máxima eficiência ( $2,31 \mu mol CO_2 / mmol H_2O m^2 s^{-1}$ ) com 9,20 mL de  $K_2SiO_3 L^{-1}$ , enquanto que aquelas em F0 I e REC E, apresentaram redução da  $EUA$  com o aumento das doses de  $K_2SiO_3$  (Figura 3c).

Os valores de  $E$  foram semelhantes aos de  $EUA$ , isto é, redução nas mudas E em F0, mas a retomada da irrigação permitiu o aumento de  $E$ . A aplicação de 8,04 mL de  $K_2SiO_3 L^{-1}$  contribuiu para a máxima  $E$  nas mudas RECE (Figura 3d). A concentração intercelular de  $CO_2$  ( $C_i$ ) foi influenciada apenas pelos regimes hídricos, sendo que as mudas F0 E tiveram maior valor ( $312,13 \mu mol CO_2 m^2 s^{-1}$ ) F0 e redução na REC (Figura 3e).

#### **Fluorescência da clorofila $a$ e Pigmentos fotossintéticos**

Os indicadores da fluorescência da clorofila  $a$  foram influenciados pelos fatores em estudo isoladamente (Figura 4 e Quadro 1). Os maiores valores de  $F_0$  e  $F_0/F_m$  ocorreram sem e com a maior dose de  $K_2SiO_3$ , enquanto que a aplicação de 7,04 e 5,34 mL de  $K_2SiO_3 L^{-1}$  contribuiu em maior  $F_v/F_m$  e  $F_v/F_0$ , respectivamente (Figura 4a e b). O maior teor de clorofila total foi observado com 6,14 mL de  $K_2SiO_3 L^{-1}$  e os carotenoides não foram influenciados pelas doses de  $K_2SiO_3$ , apresentando média geral de  $4,14 \mu g cm^2$  (Figura 4c).

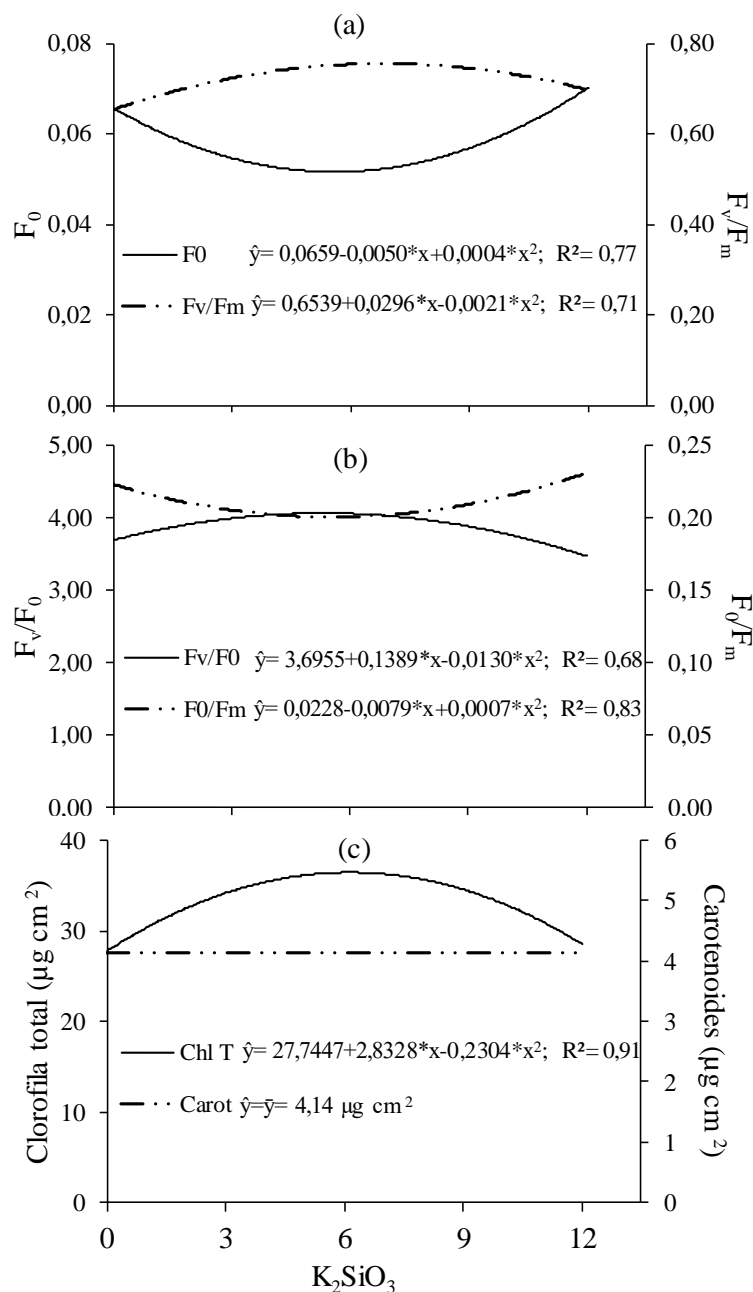


Figura 4. Fluorescência inicial –  $F_0$  e eficiência quântica potencial no fotossistema II –  $F_v/F_m$ (a), conversão de energia absorvida -  $F_v/F_0$  e rendimento máximo basal dos processos não fotoquímicos -  $F_0/F_m$ (b) e clorofila total e carotenoides (c) em folhas de *H. courbaril* cultivadas com doses de silicato de potássio ( $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ). UFGD – Dourados – MS, 2021. \* ( $p < 0,05$ ).

Quanto aos regimes hídricos e períodos de avaliação, as mudas tiveram maior  $F_0$  e  $F_0/F_m$  e menor  $F_v/F_0$  em F0 E. Apenas a  $F_0$  aumentou significativamente na RECE (Quadro

1). Observamos que em F0 E as mudas tiveram menor  $Fv/Fm$ , enquanto que na REC, essas mudas apresentaram maiores valores, embora menores do que as irrigadas diariamente.

O teor de clorofila total das mudas estressadas diminuiu na F0, enquanto que os carotenóides dessas aumentaram nesse mesmo período. Na REC as mudas previamente estressadas tiveram redução dos carotenóides semelhante ao das mudas irrigadas diariamente.

**Tabela 1.** Fluorescência inicial – F0, eficiência quântica potencial no fotossistema II –  $Fv/Fm$ , conversão de energia absorvida -  $Fv/F0$ , rendimento máximo basal dos processos não fotoquímicos -  $F0/Fm$ , clorofila total e carotenoides em folhas de *H. courbaril* cultivadas sob diferentes regimes hídricos (I: irrigado; E: estresse) avaliados e dois períodos (F0: fotossíntese próximo a zero; REC: recuperação). UFGD, Dourados – MS, 2022.

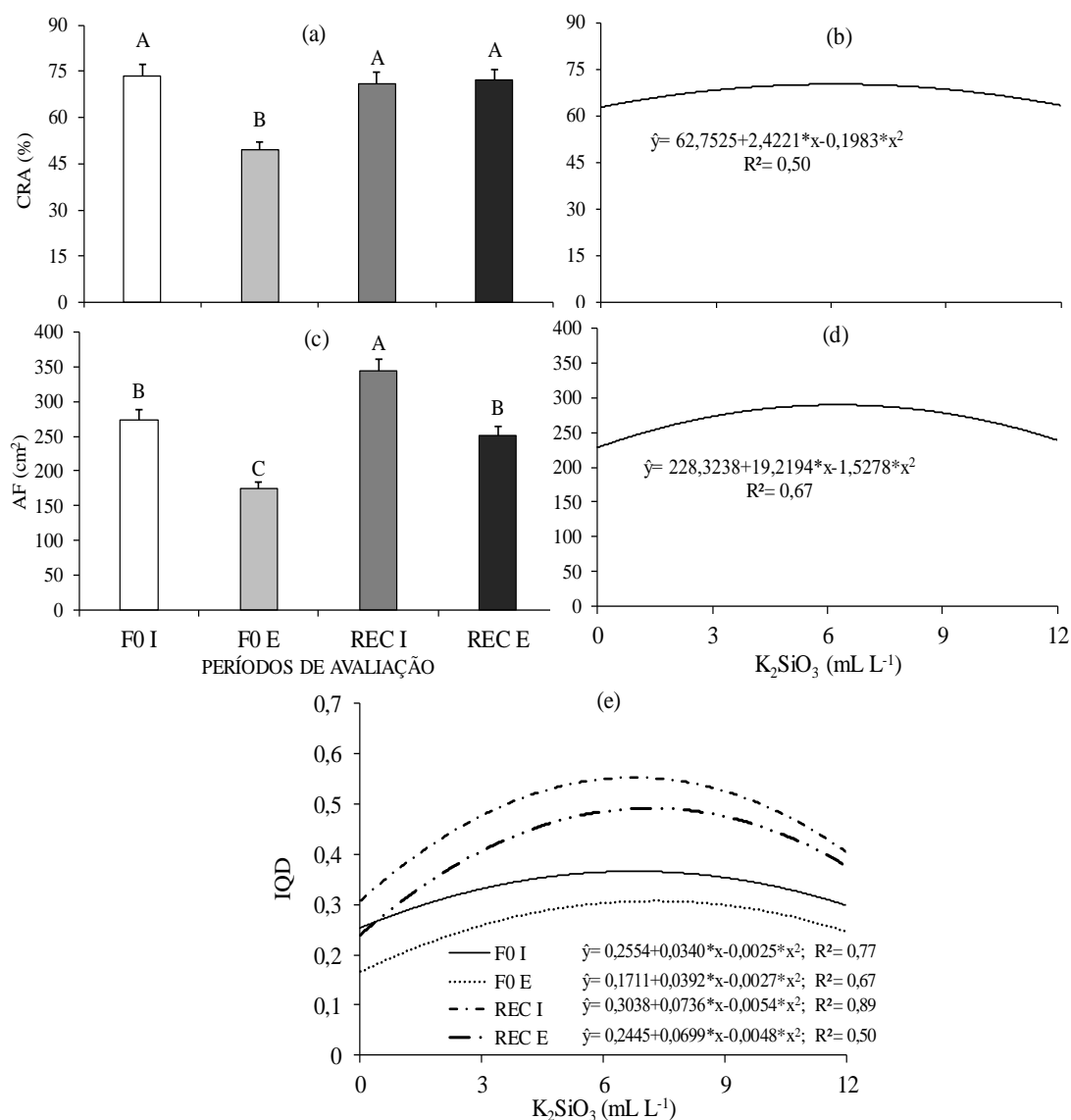
PERÍODOS DE AVALIAÇÃO	F0	$Fv/Fm$	$Fv/F0$	$F0/Fm$	Chl total	Carotenoide
					(µg cm <sup>2</sup> )	
F0 I	0,045 c	0,750 a	4,16 a	0,196 b	33,67 a	3,44 b
F0 E	0,092 a	0,640 c	2,81 b	0,265 a	30,59 b	6,26 a
REC I	0,046 c	0,760 a	4,36 a	0,188 b	33,37 a	2,86 b
REC E	0,056 b	0,708 b	3,95 a	0,206 b	31,54 ab	4,03 b

\*Médias seguidas de letras iguais nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ( $P>0,05$ ).

### Crescimento e qualidade da mudas

O conteúdo relativo de água nas folhas e a área foliar das mudas de *H. courbaril* foram influenciados pelos fatores em estudo isoladamente (Figura 5), com redução da CRA na F0 E (49,57%) e posterior aumento na REC, independente do regime hídrico. Quanto às doses de  $K_2SiO_3$ , os maiores valores de CRA e AF (70,14% e 288,76 cm<sup>2</sup>) ocorreram com 6,20 e 6,28 mL de  $K_2SiO_3$  L<sup>-1</sup>, respectivamente.

As mudas de *H. courbaril* em F0 E tiveram menores valores de IQD comparado aos demais tratamentos, mas a aplicação de 6,20 mL de  $K_2SiO_3$  L<sup>-1</sup> contribuiu para o incremento da qualidade (Figura 5e). Em geral, constatamos que as mudas cultivadas, em todos os períodos de avaliação, tiveram ajuste quadrático, com máximos valores com a dose próxima de 6,00 mL de  $K_2SiO_3$  L<sup>-1</sup>.

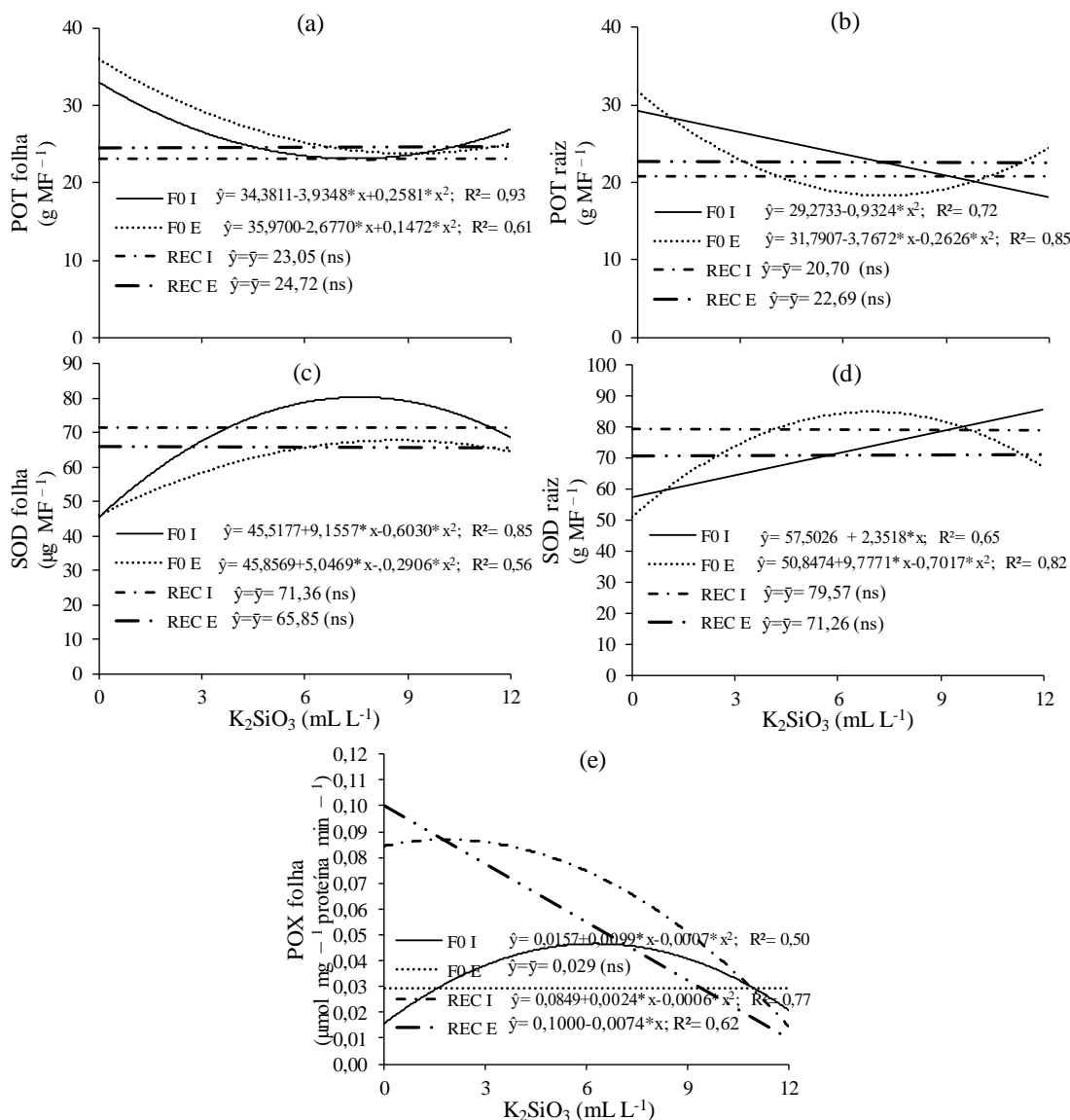


**Figura 5.** Conteúdo relativo foliar de água – CRA (a,b), área foliar – AF (c, d) e índice de qualidade de Dickson – IQD (e) de mudas de *H. courbaril* cultivadas sob diferentes regimes hídricos com doses de silicato de potássio ( $K_2SiO_3$ ) avaliadas em diferentes períodos de avaliação. UFGD, Dourados – MS, 2022. Letras iguais entre colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$ ). \*( $P < 0,05$ ).

### Enzimas antioxidantes

O teor de proteína (POT), atividade da superóxido dismutase (SOD) e peroxidase (POX) foram influenciadas pela interação entre os fatores em estudo (Figura 6). Nas folhas, as mudas em F0, independente do regime hídrico apresentaram menores valores (23,79 e 19,38 g deMF<sup>-1</sup>) de POT com 9,10 e 7,62 mL de  $K_2SiO_3$  L<sup>-1</sup> sob irrigação contínua e estresse, respectivamente. As respostas da SOD foram semelhantes às de POT em F0, com máximo

valor ( $67,76 \mu\text{g MF}^{-1}$ ) das mudas E com a dose calculada de  $8,68 \text{ mL de } \text{K}_2\text{SiO}_3 \text{ L}^{-1}$ . Na REC, a POT e SOD não variaram significativamente, independente dos regimes hídricos. Os valores de POX foliar em F0 E não variaram significativamente entre as doses de  $\text{K}_2\text{SiO}_3$ , enquanto que na REC as mudas previamente estressadas apresentaram redução com aumento das doses de  $\text{K}_2\text{SiO}_3$ .



**Figura 6.** Proteína – POT (a, b) e superóxido dismutase – SOD (c, d) em folhas e raízes, peroxidase na folha (e) em mudas de *H. courbaril* cultivadas sob diferentes regimes hídricos com doses de silicato de potássio ( $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ) avaliadas em diferentes períodos de avaliação. UFGD, Dourados – MS, 2022\* ( $P < 0,05$ ); ns= não significativo ( $p > 0,05$ )

Semelhante às folhas, na raiz, observamos redução da POT e aumento da SOD nas mudas F0 E com ponto de mínimo e máximo valor com a aplicação de  $6,96$  e  $6,42 \text{ mL de } \text{K}_2\text{SiO}_3 \text{ L}^{-1}$ .

$\text{K}_2\text{SiO}_3 \text{ L}^{-1}$ , respectivamente. Na REC, os resultados foram semelhantes, isto é, não variaram significativamente em função das doses de  $\text{K}_2\text{SiO}_3 \text{ L}^{-1}$ . Para POX, verificamos ajuste apenas nas mudas previamente estressadas na REC ( $\hat{y} = 0,0760 - 0,0064 * x$ ;  $R^2 = 0,80$ ) com redução dos valores com em função do aumento das doses de  $\text{K}_2\text{SiO}_3$ .

## DISCUSSÃO

As mudas de *H. courbaril* são sensíveis à restrição hídrica e a aplicação de  $\text{K}_2\text{SiO}_3$  contribuiu positivamente para a integridade do aparato fotossintético, atividade das enzimas antioxidantes e crescimento inicial dessa espécie sob déficit hídrico, além de auxiliar no potencial de recuperação da *A* de maneira mais rápida do que as mudas não tratadas com  $\text{K}_2\text{SiO}_3$ , confirmando nossa hipótese.

Sob baixa disponibilidade hídrica, danos ocorrem ao metabolismo fotossintético, especialmente devido a redução da condutância estomática e do potencial hídrico, promovendo limitações estomáticas e não estomáticas (BELTRAMIN et al., 2020; REIS et al., 2020; ROIG-OLIVER et al., 2021). Além disso, salientamos que quando as plantas são expostas à escassez hídrica, danos celulares são alavancados devido a superprodução de espécies reativa de oxigênio – ERO como o  $\text{H}_2\text{O}_2$  (CARVALHO et al., 2008; NACHIMUTHU et al., 2017). No entanto, os resultados do nosso estudo reforçam o papel mitigador do  $\text{K}_2\text{SiO}_3$ , durante e após o período de estresse especialmente quando utilizadas doses entre 6,00-8,00 ml do produto.

O benefício do  $\text{K}_2\text{SiO}_3$  está associado ao fato de que na planta, tanto o silício quanto o potássio exercem papel importante na promoção da tolerância a condições adversas. O silício aumentou a atividade de enzimas do metabolismo antioxidante, tal como a SOD e POX foliar e radicular, que atuaram como mecanismo de proteção contra as EROs, fato constatado com o aumento de *A* com dose próxima, mantendo a estabilidade fisiológica. Já o potássio presente no produto pode ter contribuído no ajuste osmótico e regulação do turgor (AHANGER et al., 2017; BARRAGAN et al., 2021), favorecendo o aumento do CRA nas folhas das mudas de *H. courbaril*, efeito atribuído também ao silício.

Embora as mudas estivessem expostas ao déficit hídrico (E), aqui representado pela F0, a aplicação de  $\text{K}_2\text{SiO}_3$  contribuiu na regulação da *EUA*, fato importante para manutenção das atividades fisiológicas. O silício quando depositado na folha, na forma de sílica amorfa, forma uma dupla camada sobre o poro estomático (EPSTEIN, 1999; CHUNG et al., 2020; PAVLOVIC et al., 2021), o que pode estar relacionado a perda excessiva de água por *E*,



especialmente sob baixa disponibilidade hídrica no solo, mantendo a turgescência do tecido vegetal e o CRA.

Com a manutenção da turgescência e conteúdo relativo de água foliar ocorreu maior estabilidade da  $A/C_i$ . Embora na F0 as mudas de *H. courbaril* estressadas tiveram aumento da  $C_i$ , indicando que parte do carbono fixado não está sendo assimilado, após a retomada da irrigação (REC), essas mesmas mudas apresentaram redução dessa característica e aumento da  $A/C_i$ , demonstrando o potencial de recuperação fisiológica das mudas, especialmente aquelas tratadas com 5,68 mL de  $K_2SiO_3 L^{-1}$ .

Em condições estressantes, os parâmetros da fluorescência da clorofila *a* são indicadores de alterações no aparato fotoquímico da fotossíntese (LINNÉ et al., 2021; SILVA et al., 2021). O aumento da  $F_0$  e  $F_0/F_m$  nas mudas estressadas na F0 reforçam que a baixa disponibilidade hídrica promoveu alteração na performance fotoquímica. Essa redução está associada a debilidade na capacidade do transporte de elétrons entre os aceptores no FSII (REIS et al., 2020; SANTOS et al., 2020) das mudas de *H. courbaril* e mesmo na REC, os valores de  $F_v/F_m$  das mudas previamente estressadas não foram semelhantes aos das mudas irrigadas devido ao fato dessas ainda apresentarem  $F_0$  mais alta. Por outro lado, mesmo não retomando totalmente a  $F_v/F_m$ , as trocas gasosas e o crescimento das mudas na REC não foram prejudicados.

O fato de o  $K_2SiO_3$  na dose de 7,04 mL de  $K_2SiO_3 L^{-1}$  ter contribuído no aumento da  $F_v/F_m$  e redução dos indicadores de dissipação de energia deve-se ao aumento acentuado da atividade das enzimas antioxidantes na regulação e reparo das membranas celulares, da nutrição e dos processos metabólicos das mudas de *H. courbaril*. Além disso, observamos incremento do teor de clorofila total com 6,14 mL de  $K_2SiO_3 L^{-1}$  que contribuiu na conversão de energia produzida para os processos fotoquímicos, e posterior produção de fotoassimilados.

Na literatura, valores de  $F_v/F_m$  abaixo de 0,750 indicam uma condição estressante (MAXWELL e JOHNSON, 2000). Entretanto, salientamos que esses valores de referência podem variar com diversos fatores, tais como idade, grau de sucessão ecológica e habitat natural de cada espécie. As espécies nativas no Cerrado, geralmente apresentam potencial de normalização dos processos fotoquímicos e bioquímicos da fotossíntese no período de pós-estresse, sugerindo efeitos reversíveis (BARTIERES et al., 2020; BELTRAMIN et al., 2020; LINNÉ et al., 2021).

A redução do teor de clorofila nas mudas submetidas à restrição hídrica em F0, sugere estresse oxidativo pelas EROs, enquanto que o aumento do teor de carotenoides na

mesma condição indica mecanismo estratégico de proteção dos processos metabólicos da espécie. De acordo com Mibei et al. (2017) os carotenoides auxiliam as plantas sob estresses, especialmente abióticos, pois são pigmentos acessórios e protetores das clorofilas e da fotossíntese, fato confirmado com sua redução na REC, com valores semelhantes ao das mudas irrigadas diariamente.

A redução da AF e do IQD das mudas durante a F0 indica sensibilidade morfofisiológica à escassez hídrica, o que alterou seu turgor e vigor. Embora as mudas tenham apresentado aumento da AF na REC, essas foram inferiores aos das irrigadas diariamente. Salientamos que as mudas tratadas com 6,28 mL de  $K_2SiO_3 L^{-1}$  tiveram maior AF devido terem apresentado maior A com dose próxima (6,23 mL de  $K_2SiO_3 L^{-1}$ ), ou seja, houve incremento de fotoassimilados, o que proporcionou maior IQD de todas as mudas, especialmente na REC. Além de ser constatado o efeito do  $K_2SiO_3$  no metabolismo foliar, esse composto contribui na estrutura do arranjo foliar em termo de disposição e rigidez do tecido, maximizando assim a capacidade de interceptação luminosa (KOOOPER et al., 2019).

As respostas das atividades das enzimas antioxidantes nas folhas e raízes foram semelhantes. Em geral, a aplicação do  $K_2SiO_3$ , em doses específicas, promoveu aumento da atividade de enzimas antioxidantes em todas as mudas, contribuindo para aliviar o estresse oxidativo e auxiliar no reparo das membranas. Esses parâmetros atuam como primeira linha de defesa, eliminando a possibilidade de formação de  $OH^*$  (GILL e TUTEJA, 2011; DAS e ROYCHOUDHURY, 2014; KOOOPER et al., 2019), o que pode ter favorecido aumento de A,  $F_v/F_m$  e IQD.

A partir dos resultados do nosso trabalho salientamos que as mudas de *H. courbaril* apresentaram potencial de resiliência por plasticidade fisiológica, uma vez que após a retomada da irrigação no pós-estresse, elas conseguiram apresentar valores semelhantes aos das plantas irrigadas diariamente. Fato relevante, pois, durante o período temporário de exposição ao estresse, mesmo com baixa atividade dos processos fisiológicos, a espécie em estudo apresentou 100% de sobrevivência, sugerindo redução de custos de produção devido a não ser necessário reposição das mudas. Por outro lado, ao aplicar  $K_2SiO_3$ , a atividade fisiológica permaneceu mais elevada mesmo com baixa disponibilidade hídrica durante e no pós-estresse, demonstrando incremento no vigor das mudas.

Nesse sentido, sugerimos que a espécie tem potencial de inserção em áreas que estão sujeitas a condições adversas temporárias, e que a aplicação do silicato de potássio é uma ferramenta promissora para aumentar a qualidade de mudas. Em perspectivas futuras, novos estudos com outras tecnologias devem ser realizados com a *H. courbaril* e outras

espécies nativas e frutíferas no Cerrado visando a conservação *ex situ* da agrobiodiversidade e conservação dos recursos naturais renováveis.

## CONCLUSÃO

As mudas de *Hymenaea courbaril* L. são sensíveis ao déficit hídrico e apresentam potencial de recuperação pós-estresse por plasticidade fisiológica.

A aplicação de silicato de potássio na dose entre 6,00-7,00 mL L<sup>-1</sup> contribui para o aumento da atividade de enzimas antioxidantes, que mitigam o efeito do déficit hídrico e favorecem a recuperação do metabolismo fotossintético, antioxidante e qualidade das mudas e auxiliam na resiliência da espécie

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHANGER, M. A.; TOMAR, N. S.; TITTAL, M.; ARGAL, S.; AGARWAL, R. M. Plant growth under water/salt stress: ROS production; antioxidants and significance of added potassium under such conditions. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, v. 23, p. 731-744, 2017.

ARNON, D.I. Copper enzymes in isolated chloroplasts: polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, v. 24, n. 1, p. 1-15, 1949.

BARRAGAN, V.; LEIDI, E. O.; ANDRÉS, Z.; RUBIO, L.; DE LUCA, A, FERNANDEZ, J. A.; CUBERO, B.; PARDO, J. M. Ion exchangers NHX1 and NHX2 mediate active potassium uptake into vacuoles to regulate cell turgor and stomatal function in Arabidopsis. *Plant Cell*, v. 24, p. 1127-1142, 2012.

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 Cluj-Napoca*, v. 48, n. 1, p. 234-244, 2020.

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.

BEUCHLE, R.; GRECCHI, R. C.; SHIMABUKURO, Y. E.; SELIGER, R.; EVA, H. D., SANO, E.; ACHARD, F. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. *Applied Geography*, v. 58, p. 116-127, 2015.

BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analyticalbiochemistry*, v. 72, p. 248, 1976.

BROETTO, F. *Métodos de trabalho em bioquímica vegetal e tecnologia de enzimas*. Coordenador: Fernando Broetto – Botucatu: IBB, Cultura. Acadêmica, UNESP, São Paulo, 2014. 92p

BUENO, M. M.; LELES, P. S. S.; PINTO, M. F.; RESENDE, A. S.; COUTO, B. R. M.; CARVALHO, D. F. Water use in the growth of atlantic forest tree species seedlings under different shading levels. *Ciência e Agrotecnologia*, v.45, p.220, 2021.

BUSATTO, P. C.; DA SILVA NUNES, A.; COLMAN, B. A.; DE LIMA MASSON, G. Superação de dormência em sementes de jatobá (*Hymenaea courbaril* L.). *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 8, n. 1, p. 154-160, 2013.

CARVALHO, M. H. C. Drought stress and reactive oxygen species: production, scavenging and signaling. *Plant Signaling & Behavior*, v. 3, n. 3, p. 156-165, 2008.

CHUNG, Y. S.; KIM, K.; HAMAYUN, M.; KIM, Y. Silicon confers soybean resistance to salinity stress through regulation of reactive oxygen and reactive nitrogen species. *Frontiers Plant Science*, v. 10, p. 1–11, 2020.

COSTA, C. D.; DIARIS, K. B.; GUIMARÃES, T. M. Métodos de escarificação para superação de dormência de sementes de jatobá. *Revista científica eletrônica de Engenharia Florestal*, v. 30, p. 44-52, 2017.

COSTA, E. N.; MARTINS, L. O.; REIS, L. C.; FERNANDES, M. G.; SCALON, S. P. Q. Resistance of Cowpea Genotype to *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) and Its Relationship to Resistance-Related Enzymes. *Journal of Economic Entomology*, v. 113, p. 2521-2529, 2020.

DAS, K.; ROYCHOUDHURY, A. Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants. *Frontiers in Environmental Science*, v. 2, n. 53, p. 1-13, 2014.

DEBONA, D.; RODRIGUES, F. A.; DATNOFF, L. E. Silicon's role in abiotic and biotic plant stresses. *Annual Review of Phytopathology*, v. 55 p, 85-107, 2017.

DIANAT, M.; SAHARKHIZ, M. J.; TAVASSOLIAN, I. Salicylic acid mitigates drought stress in *Lippia citriodora* L.: Effects on biochemical traits and essential oil yield. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, v. 8, p. 286-293, 2016.

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

EPSTEIN, E. Silicon. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, v. 50, p. 641–664, 1999.

ETESAMI, H. Can interaction between silicon and plant growth promoting rhizobacteria benefit in alleviating abiotic and biotic stresses in crop plants? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 253, p. 98-112, 2018.

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

GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemical*, v. 48, n. 12, p. 909-930, 2010.

GUPTA, B.; HUANG, B. Mechanism of salinity tolerance in plants: physiological, biochemical, and molecular characterization. *International journal of genomics*, v. 2014, p. 1-19, 2014.

HATTORI, T.; SONOBE, K.; ARAKI, H.; INANAGA, S; AN, P.; MORITA, S. Silicon application by sorghum through the alleviation of stress-induced increase in hydraulic resistance. *Journal of Plant Nutrition*, v. 31, p. 1482-1495, 2008.

KAPOOR, D.; SINGH, S.; KUMAR, V.; ROMERO, R.; PRASAD, R.; SINGH, J. Antioxidant enzymes regulation in plants in reference to reactive oxygen species (ROS) and reactive nitrogen species (RNS). *Plant Gene*, v. 19, n. 100182, p. 1-10, 2019.

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, p. 1-7, 2017.

LEMES, L.; DE ANDRADE, A. F. A.; LOYOLA, R. Spatial priorities for agricultural development in the Brazilian Cerrado: may economy and conservation coexist? *Biodiversity and Conservation*, v. 29, n. 5, p. 1683-1700, 2020.

LIMA, A. L. D. S.; ZANELLA, F.; CASTRO, L. D. M. D. Growth of *Hymenaea courbaril* L. var. *stilbocarpa* (Hayne) Lee et Lang. e *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong (Leguminosae) under different shading levels. *Acta Amazonica*, v. 40, n. 1, p. 43-48, 2010.

LIMA, M. S.; ARAUJO, M. M.; AIMI, S. C.; DE OLIVEIRA, V. V.; BERGHETTI, Á. L.; NASCIMENTO, N. F.; TAROUCO, C. P. Use of physiological attributes to select native forest species for forest restoration in the southern Atlantic forest biome, Brazil. *Forest Ecology and Management*, v. 501, p. 119659, 2021.

LIU, P.; YIN, L.; WANG, S.; ZHANG, M.; DENG, X.; ZHANG, S.; TANAKA, K. Enhanced root hydraulic conductance by aquaporin regulation accounts for silicon alleviated salt-induced osmotic stress in *Sorghum Bicolor* L. *Environmental and Experimental Botany*, v. 111, 42–51, 2015.

MAKORE, F.; KAMUTANDO, C. N.; NYONI, R. S.; DARI, S.; GASURA, E.; MAZARURA, U. Understanding heat and drought stress adaptation mechanisms in maize on the molecular level. *Cereal Research Communications*, p. 1-7, 2021.

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

MAXWELL, C.; JOHNSON, G. M. Chlorophyll fluorescence- a practice guide. *Journal of Experimental Botany*, v. 51, n. 354, p. 659-668, 2000.

MIBEI, E. K.; AMBUKO, J.; GIOVANNONI, J. J.; ONYANGO, A. N.; OWINO, W. Carotenoid profiling of the leaves of selected African eggplant accessions subjected to drought stress. *Food Science & Nutrition*, v. 5, n. 1, p. 113–122, 2017.

MONTIBELLER, B.; KMOCH, A.; VIRRO, H.; MANDER, Ü.; UUEMAA, E. Increasing fragmentation of forest cover in Brazil's Legal Amazon from 2001 to 2017. *Scientificreports*, v. 10, n. 1, p. 1-13, 2020.

MORANDI, D. T.; DE JESUS FRANÇA, L. C.; MENEZES, E. S.; MACHADO, E. L. M.; DA SILVA, M. D.; MUCIDA, D. P. Delimitation of ecological corridors between conservation units in the Brazilian Cerrado using a GIS and AHP approach. *Ecological Indicators*, v. 115, p. 106440, 2020.

NACHIMUTHU V. V.; PANDIAN, B. A.; ROBIN S. Role of Reactive Oxygen Species in Water-Deficit Stress Response. In: Khan M., Khan N. (eds) *Reactive Oxygen Species and Antioxidant Systems in Plants: Role and Regulation under Abiotic Stress*. Springer, p. 283-295. 2017.

NASCIMENTO, H. H. C.; NOGUEIRA, R. J. M. C.; SILVA, E. C.; SILVA, M. A. Análise do crescimento de mudas de jatobá (*Hymenaea courbaril* L.) em diferentes níveis de água no solo. *Revista Árvore*, v. 35, p. 617-626. 2011.

NASCIMENTO, H. H. C.; SANTOS, C. A.; FREIRE, C. S.; SILVA, M. A.; NOGUEIRA, R. J. M. C. Ajustamento osmótico em mudas de jatobá submetidas à salinidade em meio hidropônico. *Revista Árvore*, v. 39, p. 641–653, 2015.

OLIVEIRA, W. L.; MEDEIROS, M. B.; MOSER, P.; PINHEIRO, R.; OLSEN, L. B. Regeneração e estrutura populacional de jatobá-da-mata (*Hymenaea courbaril* L.), em dois fragmentos com diferentes graus de perturbação antrópica. *Acta Botanica Brasilica*, v. 25, p. 876-884, 2011.

PAVLOVIC, J.; KOSTIC, L.; BOSNIC, P.; KIRKBY, E. A.; NIKOLIC, M. Interactions of silicon with essential and beneficial elements in plants. *Frontiers in Plant Science*, v. 12, p. 1-19, 2021.

RAJIV, P.; CHEN, X.; LI, H.; REHAMAN, S.; VANATHI, P.; ABD-ELSALAM, K.A.; LI, X. Silica-based nanosystems: Their role in sustainable agriculture. In *Multifunctional Hybrid*

*Nanomaterials for Sustainable Agri-Food and Ecosystems*; Abd-Elsalam, K.A. Elsevier, p. 437–459, 2020.

REIS, L. C.; SCALON, S. P. Q.; DRESCH, D.; 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 Cluj-Napoca*, v. 48, n. 1, 210-220, 2020.

ROIG-OLIVER, M.; FULLANA-PERICÀS, M.; BOTA, J.; FLEXAS, J. Adjustments in photosynthesis and leaf water relations are related to changes in cell wall composition in *Hordeum vulgare* and *Triticum aestivum* subjected to water deficit stress. *Plant Science*, v. 311, n. 111015, 2021.

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.

SCALON, S. P. Q.; KODAMA, F. M.; DRESCH, D. M.; PEREIRA, Z. V.; MUSSURY, R. M.; SCALON, L. Q.; Gas Exchange in *Caryocar brasiliense* Cambess. Seedlings in Water Deficit Conditions. *Floresta e Ambiente*, v. 27, p. 2, 2020.

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, p. 1-15, 2016.

SHI, Y.; ZHANG, Y.; YAO, H. J.; WU, J. W.; SUN, H.; GONG, H. J. Silicon improves seed germination and alleviates oxidative stress of bud seedlings in tomato under water deficit stress. *Plant Physiology & Biochemical*, v. 78, p. 27-36, 2014.

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 and Biology*, v. 26, p. 209-216, 2021.

SIQUEIRA, P. P.; OLIVEIRA, P. T. S.; BRESSIANI, D.; NETO, A. A. M.; RODRIGUES, D. B. Effects of climate and land cover changes on water availability in a Brazilian Cerrado basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 37, p. 100931, 2021.



SOUSA, D. D. C. V. D.; BESSA, L. A.; SILVA, F. G.; ROSA, M.; VASCONCELOS FILHO, S. D. C.; VITORINO, L. C. Morpho-Anatomical and Physiological Responses Can Predict the Ideal Period for the Transplantation of Hydroponic Seedlings of *Hymenaea courbaril*, a Neotropical Fruit Tree. *Plants*, v. 9, p. 721, 2020.

SOUZA, C. C.; OLIVEIRA, F. A.; SILVA, I. F.; AMORIM NETO, M. S. Avaliação de métodos de determinação de água disponível e manejo da irrigação em terra roxa sob cultivo de algodoeiro herbáceo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 4, p. 338-342, 2000.

TESHOME, D. T.; ZHARARE, G. E.; NAIDOO, S. The threat of the combined effect of biotic and abiotic stress factors in forestry under a changing climate. *Frontiers in plant science*, v. 11, p. 1874, 2020.

VERMA, K.K.; LIU, X.H.; WU, K.C.; SINGH, R.K.; SONG, Q.Q.; MALVIYA, M.K.; SONG, X.P.; SINGH, P.; VERMA, C.L.; LI, Y.R. The impact of silicon on photosynthetic and biochemical responses of sugarcane under different soil moisture levels. *Silicon*, v. 12, p. 1355–1367, 2019.

VERMA, K.K.; SINGH, P.; SONG, X.P.; MALVIYA, M.K.; SINGH, R.K.; CHEN, G.L.; SOLOMON, S.; LI, Y.R. Mitigating climate change for sugarcane improvement: Role of silicon in alleviating abiotic stresses, v. 22, n. 5, p. 741-749, 2020.

WANG, Y.; CHEN, Y. F.; WU, W. H. Potassium and phosphorus transport and signaling in plants. *Journal of Integrative Plant Biology*, v. 63, n. 1, p. 34-52, 2020.

ZHU, Y. X.; XU, X. B.; HU, Y. H.; HAN, W. H.; YIN, J. L.; LI, H. L.; GONG, H. J. Silicon improves salt tolerance by increasing root water uptake in *Cucumis sativus* L. *Plant cell reports*, v. 34, n. 9, p. 1629-1646, 2015.

## CONCLUSÕES FINAIS

A espécie *H. courbaril* tem potencial para compor projetos de recuperação de áreas degradadas por ser generalista e ocorrer em vários biomas. Estudos futuros podem ser realizados para verificar o comportamento dessa espécie com doses de silicato de potássio em campo.

O déficit hídrico reduziu o metabolismo fotossintético, o crescimento e a qualidade das mudas de *Hymenaea courbaril* L. elevando a atividade das enzimas antioxidantes especialmente nas mudas 0% de sombreamento;

As mudas apresentaram maior qualidade, eficiência das trocas gasosas e fotoquímica do PS II quando cultivadas sob 50% de sombreamento auxiliando na recuperação das mudas nesta condição.

Os sombreamentos de 30% e 50% apresentaram bons resultados nas mudas de *Hymenaea courbaril* L. se mostrando promissores para utilização em futuros projetos de produção e recuperação de áreas degradadas.

A aplicação de silicato de potássio apresentou efeito benéfico na mitigação do déficit hídrico se tornando uma boa estratégia afim de garantir a qualidade das mudas *H. courbaril*.