

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

**SILÍCIO E DÉFICIT HÍDRICO NO METABOLISMO FOTOSSINTÉTICO E
CRESCIMENTO DE CHIA**

WESLEY SOUZA PRADO

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2020**

I

**SILÍCIO E DÉFICIT HÍDRICO NO METABOLISMO FOTOSSINTÉTICO E
CRESCIMENTO DE CHIA**

WESLEY SOUZA PRADO
Engenheiro Agrônomo
Msc. em Produção Vegetal

Orientadora: Prof. Dr^a. Silvana de Paula Quintão Scalon

Tese apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de doutor em Agronomia, área de concentração: Produção Vegetal.

Dourados
Mato Grosso do Sul
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

P896s Prado, Wesley Souza

SILÍCIO E DÉFICIT HÍDRICO NO METABOLISMO FOTOSSINTÉTICO E
CRESCIMENTO DE CHIA: DISPONIBILIDADES HÍDRICAS E DOSES DE SILÍCIO NA
EMERGÊNCIA E METABOLISMO DE PLANTAS DE CHIA [recurso eletrônico] / Wesley Souza
Prado. -- 2020.

Arquivo em formato pdf.

Orientadora: Silvana de Paula Quintão Scalon.

Coorientadores: Daiane Mugnol Dresch , Munir Mauad .

Tese (Doutorado em Agronomia)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2020.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:

<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. Salvia hispanica L.. 2. trocas gasosas. 3. épocas de semeadura. 4. estresse hídrico. 5. ácido silícico. I. Scalon, Silvana De Paula Quintão. II. Dresch, Daiane Mugnol. III. Mauad, Munir. IV. Título.

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

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

**SILÍCIO E DÉFICIT HÍDRICO NO METABOLISMO FOTOSSINTÉTICO E
CRESCIMENTO DE CHIA**

Por

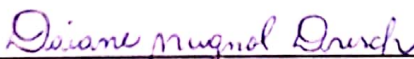
WESLEY SOUZA PRADO

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

Aprovado em:



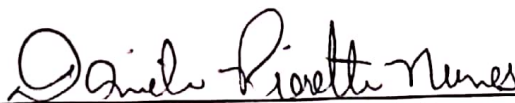
Prof. Dra. Silvana de Paula Quintão Scalon
Orientadora - UFGD/FCA



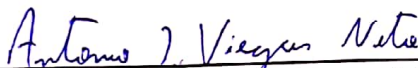
Prof. Dra. Daiane Mugnol Dresch –
Membro da banca - UFGD/FCA



Prof. Dra. Elisângela Dupas
Membro da banca - UFGD/FCA



Prof. Dra. Danieli Pieretti Nunes
Membro da banca – ANHANGUERA



Prof. Dr. Antonio Luiz Viegas Neto
Membro da banca – INSTITUTO FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL

Dedico

A Deus,

pela vida e sabedoria.

Aos meus pais João e Elite

pelo amor e incentivo

A minha Esposa, Ana Caroline Moraes Lopes

pela paciência e apoio

Aos meus irmãos, William e João Paulo

pela amizade e companheirismo.

“ Consagre ao Senhor tudo o que você faz, e os seus planos serão bem-sucedidos ”. Provérbios 16:3

AGRADECIMENTOS

Ao nosso bom Deus, por iluminar meu caminho e conceder forças para lutar por meus objetivos.

A toda minha família, bem mais precioso que possuo, pelo amor e incentivo em todos os momentos de minha vida.

À Universidade Federal da Grande Dourados e em especial a Faculdade de Ciências Agrárias pela oportunidade de realização do curso de Agronomia e pela realização do curso de Mestrado e Doutorado em Agronomia.

A Prof. Dr^a. Silvana de Paula Quintão Scalon pela orientação, paciência, por valiosos ensinamentos, amizade e pela sua imensa contribuição para minha formação acadêmica e profissional, ao longo desse período.

A Dr^a Daiane Mugnol Dresch e ao Professor Dr. Munir Mauad pela co-orientação e participação na banca examinadora, contribuindo com suas valiosas correções e sugestões.

Aos membros da banca pelas correções e valiosas sugestões.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Agronomia que contribuíram para minha formação acadêmica e aperfeiçoamento profissional.

Aos amigos de Graduação e Pós-graduação Maílson Vieira Jesus, Andrei Araújo Andrade, Ledenilson Izaias da Silva, Fabrício da Silva Santos, e a minha esposa Ana Caroline Moraes Lopes pela enorme contribuição na execução do experimento, e acima de tudo pela amizade.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Capes, pela concessão da bolsa de Doutorado.

Enfim, a todos que de uma forma ou de outra contribuíram para a execução deste trabalho, o meu reconhecimento e gratidão.

Sumário

RESUMO GERAL.....	XII
ABSTRACT.....	XIII
INTRODUÇÃO GERAL.....	14
CAPÍTULO I - DISPONIBILIDADES HÍDRICAS E DOSES DE SILICIO NA EMERGÊNCIA E METABOLISMO DE PLANTAS DE CHIA	21
RESUMO	211
ABSTRACT.....	22
INTRODUÇÃO	23
MATERIAL E MÉTODOS	26
RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
CONCLUSÃO	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56
CAPITULO II - SILICIO NA MITIGAÇÃO DO DÉFICIT HÍDRICO E POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO DE CHIA	61
RESUMO	61
ABSTRACT.....	62
INTRODUÇÃO	63
MATERIAL E MÉTODOS	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	832
CONCLUSÃO.....	85
ANEXOS.....	86

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I	PÁGINA
FIGURA 1. Emergência na Época 1 (a) e Época 2 (b) de plantas de Chia (<i>Salvia hispanica L.</i>) em função de diferentes níveis de Silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD 2019	30
FIGURA 2. Índice de velocidade de emergência na época 1 (a) e época 2 (b) de plantas de Chia (<i>Salvia hispanica L.</i>) em função de doses de silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019	31
FIGURA 3. Taxa fotossintética (A) na Época 1 (a – c) e Época 2 (b – d) de plantas de Chia (<i>Salvia hispanica L.</i>) em função de diferentes níveis de Silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019.....	33
FIGURA 4. Transpiração (E) na Época 1 (a – c) e Época 2 (b – d) de plantas de Chia (<i>Salvia hispanica L.</i>) em função de diferentes níveis de Silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019	35
FIGURA 5. Concentração interna de CO ₂ (Ci) na Época 1 (a – c) e Época 2 (b – d) de plantas de Chia (<i>Salvia hispanica L.</i>) em função de diferentes níveis de Silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019.....	37
FIGURA 6. Condutância estomática (Gs) na Época 1 (a – b) e Época 2 (c – d) de plantas de Chia (<i>Salvia hispanica L.</i>) em função de diferentes níveis de Silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019.....	38
FIGURA 7. Eficiência de carboxilação da Rubisco (A/Ci) na Época 2 (a – b) de plantas de Chia (<i>Salvia hispanica L.</i>) em função de diferentes níveis de Silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019.....	39
FIGURA 8. Eficiência instantânea do uso da água (A/E) na Época 1 (a – c) e Época 2 (b - d) de plantas de Chia (<i>Salvia hispanica L.</i>) em função de diferentes	

níveis de Silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019.....	39
FIGURA 9. Eficiência intrínseca do uso da água (A/Gs) na Época 1 (a – b) e Época 2 de plantas de Chia (<i>Salvia hispanica L.</i>) em função de diferentes níveis de Silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019.....	40
FIGURA 10. Fluorescência inicial (F0) na Época 1 (a – c) e Época 2 (b – d) de plantas de Chia (<i>Salvia hispanica L.</i>) em função de diferentes níveis de Silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019.....	41
FIGURA 11. Eficiência quântica potencial do FS II (Fv/Fm) na Época 1 (a – c) e Época 2 (b – d) de plantas de Chia (<i>Salvia hispanica L.</i>) em função de diferentes níveis de Silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019	42
FIGURA 12. Índice de clorofila (SPAD) na Época 2 de plantas de Chia (<i>Salvia hispanica L.</i>) em função de diferentes níveis de Silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019.....	43
FIGURA 13. Comprimento de raiz (CR) (b) na Época 2 de plantas de Chia (<i>Salvia hispanica L.</i>) em função de diferentes níveis de Silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019.....	44
FIGURA 14. Capacidade de retenção de água na folha (CRAf) na Época 1 (a – c) e na Época 2 (b – d) plantas de Chia (<i>Salvia hispanica L.</i>) em função de diferentes níveis de Silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019.....	45
FIGURA 15. Comprimento de parte aérea (CPA) na Época 1 (a – b) e na Época 2 plantas de Chia (<i>Salvia hispanica L.</i>) em função de diferentes níveis de Silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019.....	47
FIGURA 16. Diâmetro de colmo (DC) na Época 1 (a – c) e na Época 2 (b – d) plantas de Chia (<i>Salvia hispanica L.</i>) em função de diferentes níveis de Silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019.....	48

- FIGURA 17. Área foliar (AF) na Época 1 (a – c) e na Época 2 (b – d) plantas de Chia (*Salvia hispanica L.*) em função de diferentes níveis de Silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019.....49
- FIGURA 18. Número de folhas (NF) na Época 1 (a – c) e na Época 2 (b – d) plantas de Chia (*Salvia hispanica L.*) em função de diferentes níveis de Silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019.....50
- FIGURA 19. Massa fresca da parte aérea (MFPA) na Época 1 (b) e na Época 2 (a – c) plantas de Chia (*Salvia hispanica L.*) em função de diferentes níveis de Silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019.....51
- FIGURA 20. Massa seca da parte aérea (MSPA) na Época 1 (b) e na Época 2 (a – c) plantas de Chia (*Salvia hispanica L.*) em função de diferentes níveis de Silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019.....52
- FIGURA 21. Massa fresca da raiz (MFR) na Época 1 (a – c) e na Época 2 (b – d) plantas de Chia (*Salvia hispanica L.*) em função de diferentes níveis de Silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019.....53

CAPÍTULO II

- FIGURA 1. Taxa Fotossintética (A) (a, b - c) de plantas de Chia (*Salvia hispanica L.*) em função de diferentes níveis de Silício associado ao déficit hídrico intermitente. Dourados, UFGD, 201968
- FIGURA 2. Concentração interna de CO₂ (Ci) (a - b) de plantas de Chia (*Salvia hispanica L.*) em função de diferentes níveis de Silício associado ao déficit hídrico intermitente. Dourados, UFGD, 201970
- FIGURA 3. Eficiência de carboxilação da Rubisco (A/Ci) (a, b - c) de plantas de Chia (*Salvia hispanica L.*) em função de diferentes níveis de Silício associado ao déficit hídrico intermitente. Dourados, UFGD, 201971

FIGURA 4. Eficiência intrínseca do uso da água (A/Gs) (a, b - c) de plantas de Chia (<i>Salvia hispanica L.</i>) em função de diferentes níveis de Silício associado ao déficit hídrico intermitente. Dourados, UFGD, 2019	73
FIGURA 5. Fluorescência inicial (F0) (a, b - c) de plantas de Chia (<i>Salvia hispanica L.</i>) em função de diferentes níveis de Silício associado ao déficit hídrico intermitente. Dourados, UFGD, 2019	74
FIGURA 6. Índice de clorofila (SPAD) (a - b) de plantas de Chia (<i>Salvia hispanica L.</i>) em função de diferentes níveis de Silício associado ao déficit hídrico intermitente. Dourados, UFGD, 2019	76
FIGURA 7. Comprimento da parte aérea (CPA) (a - b) de plantas de Chia (<i>Salvia hispanica L.</i>) em função de diferentes níveis de Silício associado ao déficit hídrico intermitente. Dourados, UFGD, 2019	77
FIGURA 8. Comprimento de raiz (CR) (a - b) de plantas de Chia (<i>Salvia hispanica L.</i>) em função de diferentes níveis de Silício associado ao déficit hídrico intermitente. Dourados, UFGD, 2019.....	77
FIGURA 9. Diâmetro de colmo (DC) (a, b - c) de plantas de Chia (<i>Salvia hispanica L.</i>) em função de diferentes níveis de Silício associado ao déficit hídrico intermitente. Dourados, UFGD, 2019	78
FIGURA 10. Número de folhas (NF) (a – b) de plantas de Chia (<i>Salvia hispanica L.</i>) em função de diferentes níveis de Silício associado ao déficit hídrico intermitente. Dourados, UFGD, 2019	79
FIGURA 11. Massa fresca da parte aérea (MFPA) (a - b) e Massa seca da parte aérea (MSPA) (c) de plantas de Chia (<i>Salvia hispanica L.</i>) em função de diferentes níveis de Silício associado ao déficit hídrico intermitente. Dourados, UFGD, 2019	80
FIGURA 12. Massa fresca de raiz (MFR) (a) e Massa seca de raiz (MSR) (b) de plantas de Chia (<i>Salvia hispanica L.</i>) em função de diferentes níveis de Silício associado ao déficit hídrico intermitente. Dourados, UFGD, 2019.....	81

LISTA DE ANEXOS

		PÁGINA
ANEXO 1.	Resumo da análise de variância para porcentagem de emergência (E%) e índice de velocidade de emergência (IVE) em função de diferentes níveis de silício e capacidades de retenção de água no solo para as duas épocas de semeadura, Dourados, UFGD, 2019.....	86
ANEXO 2.	Resumo da análise de variância para taxa fotossintética (A), transpiração foliar (E), condutância estomática (gs), concentração interna de CO ₂ (Ci), eficiência instantânea do uso da água (EUA), eficiência intrínseca do uso da água (EiUA), eficiência de carboxilação da Rubisco (A/Ci) em função de diferentes níveis de silício e capacidades de retenção de água no solo para as duas épocas de semeadura, Dourados, UFGD, 2019.....	87
ANEXO 3.	Resumo da análise de variância para fluorescência inicial (F0), eficiência quântica potencial do fotossistema II (Fv/Fm), conteúdo relativo de água nas folhas (CRAf), comprimento da parte aérea (CPA), comprimento da raiz (CR), diâmetro de colmo (DC), índice de clorofila (SPAD), número de folhas (NF), área foliar (AF), massa fresca de parte aérea (MFPA), massa fresca de raiz (MFR), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR) em função de diferentes níveis de silício e capacidades de retenção de água no solo para a época 1, Dourados, UFGD, 2019	88
ANEXO 4.	Resumo da análise de variância para fluorescência inicial (F0), eficiência quântica potencial do fotossistema II (Fv/Fm), conteúdo relativo de água nas folhas (CRAf), comprimento da parte aérea (CPA), comprimento da raiz (CR), diâmetro de colmo (DC), índice de clorofila (SPAD), número de folhas (NF), área foliar (AF), massa fresca de parte aérea (MFPA), massa fresca de raiz (MFR), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR) em função de diferentes níveis de silício e capacidades de retenção de água no solo para a época 2, Dourados, UFGD, 2019.....	89

ANEXO 5.	Resumo da análise de variância para taxa fotossintética (A), concentração interna de CO_2 (C_i), eficiência intrínseca do uso da água (E_iUA), eficiência de carboxilação da Rubisco (A/C_i) em função de diferentes níveis de silício associados ao déficit hídrico intermitente, Dourados, UFGD, 2019.....	90
ANEXO 6.	Resumo da análise de variância para fluorescência inicial (F_0), comprimento da parte aérea (CPA), comprimento da raiz (CR), índice de clorofila (SPAD), diâmetro de colmo (DC), número de folhas (NF), massa fresca de parte aérea (MFPA), massa fresca de raiz (MFR), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR) em função de diferentes níveis de silício associados ao déficit hídrico intermitente, Dourados, UFGD, 2019.....	91
ANEXO 7.	Emergência em função de diferentes de capacidades de retenção de água, Dourados, UFGD, 2019.....	92
ANEXO 8.	Avaliação na fotossíntese próximo de zero (F_0) para o ensaio do déficit hídrico intermitente, Dourados, UFGD, 2019.....	93

SILÍCIO E DÉFICIT HÍDRICO NO METABOLISMO FOTOSSINTÉTICO E CRESCIMENTO DE CHIA

Autor: Wesley Souza Prado

Orientadora: Dr^a: Silvana de Paula Quintão Scalon

RESUMO GERAL

O fornecimento de silício (Si) pode promover efeitos benéficos ao desenvolvimento das culturas, resultando em maiores taxas fotossintéticas e condutância estomática em comparação com plantas com tratamento deficiente em Si. Diante da escassez de informações sobre a aplicação de Si na cultura da chia (*Salvia hispânica* L.). Objetivou-se no presente estudo avaliar o efeito de doses de silício associado ao déficit hídrico intermitente, bem como avaliar o efeito de doses de silício associado a capacidades de retenção de água e épocas de semeadura na emergência, crescimento e metabolismo fotossintético das plantas de chia. Os experimentos foram desenvolvidos em viveiro na Faculdade de Ciências Agrárias (FCA) da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), durante o período de Janeiro a Julho de 2019. O primeiro experimento foi realizado em duas épocas de avaliação, com semeadura em Janeiro e Maio, respectivamente, ambos constituídos por quatro capacidades de retenção de água (CRA) (25, 50, 75 e 100%) e quatro doses de Silício (0, 100, 150 e 200 kg/há). O segundo ensaio semeado em Abril com quatro doses de silício (0, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹), duas condições de irrigação (contínua e intermitente) e a três períodos de avaliação (Início – T0, 50 dias após a semeadura, quando as folhas das plantas estavam com tamanho adequado para a avaliação no aparelho fotossintético (IRGA), Fotossíntese próximo de Zero- FS0, ocorrendo aos 57 dias após a semeadura, quando um dos tratamentos atingiu esse nível e Final – F, ocorreu ao fim do experimento, aos 91 dias após a semeadura, próximo da senescência), todos alocados em delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial com quatro repetições. A taxa fotossintética das plantas na Época 1 não variaram significativamente entre as doses de Si nas CRA de 50%. Na Época 2 houve a máxima concentração interna de CO₂ (Ci) foi observada para a CRA de 50% e a eficiência de carboxilação da rubisco (A/Ci) não teve efeito significativo na CRA de 50%. A época 2 proporciona os melhores resultados para emergência de chia. A capacidade de retenção de água de 100% associada à dose de silício de 100 kg/há proporcionou maior eficiência nas trocas gasosas e crescimento de plantas. As plantas cultivadas sob irrigação contínua apresentaram maior crescimento de plantas de chia. A dose de Si de 100 kg/há atenua o déficit hídrico, favorecendo a manutenção e a recuperação do metabolismo fotossintético em plantas de chia.

Palavras chave: *Salvia hispanica* L. , trocas gasosas, épocas de semeadura, chia, estresse hídrico, ácido silícico

SILICON AND WATER DEFICIT PHOTOSYNTHETIC IN METABOLISM AND GROWTH OF CHIA

Author: Wesley Souza Prado

Adviser: Dr^a: Silvana de Paula Quintão Scalon

GENERAL ABSTRACT

The supply of silicon (Si) can promote beneficial effects to the development of crops, resulting in higher photosynthetic rates and stomatal conductance compared to plants with poor Si treatment. Given the lack of information on the application of Si in the culture of chia (*Salvia hispanica* L.). The objective of this study was to evaluate the effect of silicon doses associated with intermittent water deficit, as well as to evaluate the effect of silicon doses associated with water retention capacities and sowing times in the emergence, growth and photosynthetic metabolism of chia plants. The experiments were developed in a nursery at the Faculty of Agricultural Sciences (FCA) of the Federal University of Grande Dourados (UFGD), during the period from January to July 2019. The first experiment was carried out in two evaluation periods, with sowing in January and May, respectively, both consisting of four water retention capacities (CRA) (25, 50, 75 and 100%) and four doses of silicon (0, 100, 150 and 200 kg ha⁻¹). The second trial sown in april with four doses of silicon (0, 100, 150 and 200 kg ha⁻¹), two irrigation conditions (continues and intermittent) and three evaluation periods (Start - T0, 50 days after sowing, when the leaves of the plants were adequately sized for evaluation in the photosynthetic apparatus (IRGA), photosynthesis close to Zero-FS0, occurring at 57 days after sowing, when one of the treatments reached this level and Final - F, occurred at the end of the experiment, 91 days after sowing, close to senescence), where all were allocated in a completely randomized design in a factorial scheme with four replications. The photosynthetic rate of plants in season did not vary significantly between doses of Si in CRA by 50%. In season 2, the maximum internal concentration of CO₂ (Ci) was observed for the 50% CRA and the rubisco carboxylation efficiency (A/Ci) had no significant effect on the 50% CRA. Season 2 provides the best results for chia emergence. The 100% water retention capacity associated with the 100 kg ha⁻¹ silicon dose provided greater efficiency in gas exchange and plant growth. Plants grown under continuous irrigation showed higher growth of chia plants. The 100 kg ha⁻¹ Si dose attenuates the water deficit, favoring the maintenance and recovery of photosynthetic metabolism in chia plants.

Key words: *Salvia hispanica* L., gas exchange, sowing times, chia, water stress, silicic acid

INTRODUÇÃO GERAL

A chia (*Salvia hispanica* L.) é uma planta herbácea pertencente à família Lamiaceae, que tem despertado grande interesse na utilização de suas sementes na alimentação humana e animal. Frequentemente suas plântulas são consumidas na forma de salada, e suas sementes em bebidas, cereais matinais, em misturas para bolos ou pães, a partir do óleo da semente, ou é consumida *in natura*. É utilizada para alimentação de porcos, frangos e coelhos na forma de ração e suplemento mineral (MIGLIAVACCA et al., 2014).

Os grãos de chia podem ser considerado excelente fonte nutricional, uma vez que apresentam elevado teor de proteínas (19- 23%), fibras alimentares (34,6%), cálcio (0,456%) e ácidos graxos (23%). O teor de aminoácidos dos grãos se assemelha muito ao da soja que é considerada a referência em conteúdo de proteína vegetal (COELHO e SALAS-MELLADO, 2014 e FERREIRA, 2013). O grão de chia não contém glúten, o que o torna uma excelente opção de alimento para as pessoas celíacas (BUENO et al., 2010).

O cultivo comercial da cultura concentra-se em países como Austrália, Bolívia, Colômbia, Guatemala, México, Peru, Argentina e Paraguai (BUSILACHI et al., 2013). No Brasil, as regiões do oeste Paranaense e noroeste do Rio Grande do Sul investem no cultivo de chia, apresentando bons resultados, apesar da escassez de informação a respeito da cultura (MIGLIAVACCA et al., 2014).

As plantas possuem melhor desenvolvimento em solos com textura média a arenosa, podendo ser cultivada em solos argilosos que sejam bem drenados, não tolerando solos alagados (COATES, 2011). Como a maioria das plantas do gênero *Salvia*, possui uma tolerância à acidez, entretanto não consegue suportar geadas, além de requerer áreas de plantio a pleno sol e temperaturas amenas durante a noite, e sua frutificação não ocorre em condições de sombra (JIMÉNEZ, 2010). Apesar de tolerar condições de solos ácidos, recomenda-se a correção do solo e o fornecimento de cálcio e magnésio na cultura (MIRANDA, 2012). A faixa de pH adequada para o cultivo situa-se entre 6,5 e 7,5 e . e altitudes entre 0 a 2600 m (POZO, 2010).

A disponibilidade hídrica e a radiação solar também são fatores importantes para a cultura, influenciando no crescimento, no desenvolvimento das plantas e na produtividade de grãos da espécie. A água é o principal constituinte do

tecido vegetal, representando cerca de 80 a 95 % nas plantas herbáceas, sendo necessária como reagente no metabolismo vegetal, transporte e translocação de solutos, na turgescência celular, na abertura e fechamento dos estômatos e na penetração do sistema radicular (TAIZ et al., 2017). A disponibilidade de água é ainda responsável pela forma e estrutura dos órgãos e essencial para o crescimento e desenvolvimento das culturas, sejam elas anuais ou perenes (BERGAMASCHI; BERGONCI, 2017).

Pouco se sabe acerca dos mecanismos relacionados à sua fisiologia e metabolismo frente às condições de estresse impostas pelo ambiente, especialmente aquelas relacionadas ao déficit hídrico, situação que limita o crescimento e desenvolvimento das espécies, além de regular a sua distribuição espacial (SANTANA et al., 2016). Informações sobre a influência do fotoperíodo na duração do ciclo também são bastante restritas. Sabe-se que a planta de chia é considerada uma planta de dias curtos (JAMBOONSRI et al. (2011). Como existem poucas informações sobre a resposta da chia as variáveis meteorológicas como temperatura do ar, fotoperíodo, radiação solar e precipitação, estudos são fundamentais para definir melhores épocas de cultivo que propiciem as melhores condições de desenvolvimento das plantas para obtenção das maiores produtividades.

Assim, a disponibilidade de água é um dos fatores que mais afetam a emergência das plântulas, sendo de extrema importância que o substrato utilizado esteja suficientemente úmido para que ocorra a hidratação da semente e o crescimento do embrião. Entretanto, o excesso também é prejudicial, pois reduz a disponibilidade de oxigênio e, conseqüentemente a respiração, atrasando ou paralisando o desenvolvimento das plântulas, podendo causar anormalidades ou até mesmo a morte das mesmas. Neste contexto, é de extrema importância a presença de um nível adequado de hidratação que permita a reativação dos processos metabólicos, culminando no crescimento do eixo embrionário (MARCOS FILHO, 2015).

Nas plantas, o estresse causado pelo déficit de água afeta o potencial hídrico das folhas e pode alterar a atividade das suas trocas gasosas, uma vez que o conteúdo total de água das células e dos tecidos vegetais está abaixo da máxima hidratação (TAIZ et al., 2017). Algumas respostas ao déficit hídrico são comumente observadas, tais como o fechamento estomático e a conseqüente diminuição da fotossíntese e da transpiração, além de danos às membranas dos tecidos, a perda de pigmentos relacionados à fotossíntese e o comprometimento dos processos de fixação e

assimilação do gás carbônico, e na ação de enzimas que combatem o estresse oxidativo, como por exemplo, a superóxido dismutase (SOD) e a peroxidase (POD) (FLEXAS et al., 2012; CAMPELO et al., 2015).

Um dos elementos estudados e que desempenha um papel importante na tolerância a estresses ambientais é o silício (Si), o qual é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre, porém na maioria das classes de solos, que já passaram por processo de dessilicatização, a exemplo dos Latossolos, apresentam baixos teores solúveis desse elemento (GONG, 2005; MA, 2004; ZHU et al., 2004;).

O silício pode ser absorvido do solo através das raízes por fluxo de massa, e posteriormente transportado pelo xilema e depositado na parede celular na forma de sílica amorfa hidratada ou opala biogênica ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Uma vez depositado, o silício torna-se imóvel e não mais se redistribui na planta (MALAVOLTA, 2006).

Os benefícios proporcionados com adubação de Si às plantas são observados com maior frequência em solos pobres em Si e em anos com adversidades, como veranicos ou períodos secos prolongados, geada, alta incidência de pragas e/ou doenças. Sob tais condições, a planta bem nutrida com silício tolera por um período maior a falta de água, pois usa melhor água absorvida e perde numa velocidade menor em relação à planta com baixo teor de silício (MARAFON e ENDRES, 2011).

O Si atua de três formas na proteção das plantas: bioquímica, fisiológica e física. Considerando as duas primeiras, o acúmulo de Si nas plantas pode aumentar a capacidade de tolerância à seca, mantendo o potencial hídrico foliar, realizando o ajuste osmótico, modificando atributos de trocas gasosas como a assimilação de CO_2 e as taxas de transpiração, reduzindo o estresse oxidativo, provocando modificações nos osmólitos, fitormônios e na expressão de genes (FAROOQ e DIETZ, 2015). E física, pela melhoria da arquitetura foliar, proporcionada pela menor abertura do ângulo foliar, deixando as folhas mais eretas, o que, por sua vez, reduz o autossombreamento, além da deposição de Si no apoplasto das folhas, proporcionando maior resistência a danos mecânicos (MA et al., 2011).

A manutenção do potencial hídrico foliar em plantas sob condições de deficiência hídrica é uma das principais funções da nutrição com Si, devido à formação de camada dupla de sílica-cutícula nas células epidérmicas da folha (LUX et al., 2002;

PEI et al., 2010). Outros efeitos benéficos podem incluir a redução da perda de água por transpiração, melhor osmorregulação e equilíbrio dos mecanismos antioxidantes (ROUPHAEL et al., 2012).

Diferentes concentrações de Si potencializam a atividade de enzimas antioxidantes como a catalase, ascorbato peroxidase e superóxido dismutase (KHOSHGOFTARMANESH et al., 2014; IMTIAZ et al., 2016), além de promover ajustamento osmótico (PILON et al., 2014). Para Heckman (2013), esse nutriente torna as células epidérmicas das folhas mais eretas, o que induz maior absorção de CO₂, em decorrência disso, há um aumento na eficiência fotossintética e no teor de clorofila. Provavelmente isto ocorre pelo acúmulo de Si na superfície foliar, servindo como barreira física e tendo um importante papel na regulação osmótica, diminuindo assim o estresse causado pelo déficit hídrico. (CANTUÁRIO et al., 2014).

Segundo Gao et al. (2004), Gong (2005), Gunes et al. (2007) e Zhu et al. (2004) a aplicação de Si induziu maior concentrações de prolina em condições de déficit hídrico nos cultivos de *Zea Mays*, *Triticum vulgare*, *Cucumis sativus L.*, respectivamente. De acordo com esses autores, o efeito do Si na maior tolerância das plantas superiores a seca poderia estar associada a um aumento a ação das defesas antioxidantes, uma redução nos danos oxidativos a moléculas funcionais e membranas, e manutenção de muitos sistemas fisiológicos bem como processos fotossintéticos sob condições de déficit hídrico.

Entretanto, não há informação na literatura que indica se a aplicação de Si na cultura da chia pode ter efeitos benéficos em relação ao estresse hídrico. Portanto, o objetivo do presente estudo foi avaliar o efeito de doses de silício associado ao déficit hídrico intermitente, a diferentes capacidades de retenção de água e épocas do ano na emergência, crescimento e metabolismo fotossintético das plantas de chia (*S. hispanica*).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J.I. **As Plantas e o Clima: princípios e aplicações**. Guaíba: AGROLIVROS, 2017. 352p.

BUENO, M. et al. Análisis de la calidad de los frutos de *Salvia hispanica* L. (Lamiaceae) comercializados em la ciudad de Rosario (Santa Fe, Argentina). **Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromaticas**, Santiago, v.9, n.3, p.221-227, 2010.

BUSILACCHI, H. et al. Evaluación de *Salvia hispanica* L. cultivada en el sur de Santa Fé (República Argentina). **Cultivos Tropicales**, San José de las Lajas, v.34, n.4, p.55-59, 2013.

CAMPELO DH, LACERDA CF, SOUSA JA, CORREIA D, BEZERRA AME, ARAÚJO JDM AND NEVES ALR. Trocas gasosas e eficiência do fotossistema II em plantas adultas de seis espécies florestais em função do suprimento de água no solo. **Revista Árvore**, 39 (5): pg. 973-983, 2015.

CANTUÁRIO, F.S.; LUZ, J.M.Q.; PEREIRA A.I.A.; SALOMÃO L.C.; REBOUÇAS, T.N.H. Podridão apical e escaldadura em frutos de pimentão submetidos a estresse hídrico e doses de silício. **Horticultura Brasileira**, v.32, n.2, p.215-219, 2014.

COATES, W. Whole and Ground Chia (*Salvia hispanica* L.) Seeds, Chia Oil- Effects on Plasma Lipids and Fatty Acids. In: PREEDY, V. R.; WATSON, R. R.; PATEL, V. B. (Ed) **Nuts and Seeds in Health and Disease Prevention**. San Diego: Academic Press, p.309-314, 2011.

COELHO, M.S.; SALAS-MELLADO, M.D.L.M. Revisão: Composição química, propriedades funcionais e aplicações tecnológicas da semente de chia (*Salvia hispanica* L) em alimentos. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v.17, n.4, p.259-268, 2014.

FAROOQ, M.A.; DIETZ, K.J. Silicon as versatile player in plant and human biology: overlooked and poorly understood. **Frontiers in Plant Science**, v.6, art.994, 2015.

FERREIRA, T.R.B. **Caracterização nutricional e funcional da farinha de chia (*Salvia hispanica*) e sua aplicação no desenvolvimento de pães**. 2013. 112p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, São Paulo.

FLEXAS J; BARBOUR M.M; BRENDELO, C.H.M; CARRIQUÍ, M; DÍAZ-ESPEJO A; DOUTHE, C; DREYER, E; FERRIO, J.P; GAGO, J. Mesophyll diffusion conductance to CO₂: an unappreciated central player in photosynthesis. **Plant Science**. 193: 70-84. 2012.

GAO, X.; ZOU, C.; WANG, L.; ZHANG, F. Silicon improves water use efficiency in Maize plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 27, n. 8, p. 1457-1470, 2004.

GONG, H. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. **Plant Science**, v. 169, n. 13-14, p. 313–321, 2005.

GUNES, A. INAL, A. COBAN, S. Silicon- mediated changes on some physiological and enzymatic parameters symptomatic of oxidative stress in barley grown in sodic-B toxic soil. **Journal of Plant Physiology**, v. 164, n. 6, p. 807-811, 2007.

HECKMAN. Silicon: a beneficial substance. **Better Crops**, v.97,n.4,p. 14-16. 2013.

IMTIAZ, M.; RIZWAN,M.S.; MUSHTAQ,M.A.; ASHRAF,M; SHAHZAD,S.M.; YOUSA ,B.;AS EED,D.A.; RIZWAN,M.; NAWAZ,A.; MEHMOOD,S.;TU,S. Silicon occurrence, uptake, transport and mechanisms of heavy metals, minerals and salinity enhanced tolerance in plants with future prospects: A review. **Journal of Environmental Management**, v.183,v.3, p. 521-529,2016.

JAMBOONSRI, W.; PHILLIPS, T.D., GENEVE, R.L.; CAHILL. J.P. Extending the range of an ancient crop, *Salvia hispanica* L. – a new ϕ 3 source. **Genetic Resource and Crop Evolution**, 59:171-178. 2011.

JIMÉNEZ, F.E.G. **Caracterización de compuestos fenólicos presente en la semilla y aceite de chía (*Salvia hispanica* L.), mediante electroforesis capilar**. 2010. 101p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Alimentos) – Instituto Politécnico Nacional Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Cidade do México.

KHOSHGOFTARMANESH, A.H.; KHODARAHMI, S.; HAGHIGHI, M. Effect of silicone nutrition on lipid peroxidation and antioxidant response of cucumber plants exposed to salinity stress. **Archives of Agronomy and Soil Science**,v. 60,n.5, p.639–653, 2014.

LUX, A; LUXOVA, M; HATTORI, T; INANAGA, S; SUGIMOTO, Y. Silicification in sorghum (*Sorghum bicolor*) cultivars with different drought tolerance. **Physiologia Plantarum**, v.115, p.87–92, 2002.

MA, J. F. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 50, n. 1, p. 11-18, 2004.

MA, J.F; YAMAJI, N; MITANI-UENO, N. Transport of silicone from roots to panicles in plants. Proceedings of the Japan Academy, Series B, **Physical and Biological Sciences**, v.87, p.377-385, 2011.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Editora Ceres, 2006. 631p.

MARAFON, A.C e ENDRES, L. **Adubação silicatada em cana-de-açúcar**. Documentos Embrapa, 165, Dezembro, 2011.

MARCOS FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. 2.ed. Londrina: Abrates, 2015.

MIGLIAVACCA, R.A; SILVA, T.R.B.; VASCONCELOS, A.L.S; FILHO, W.M; BAPTISTELLA, J.L.C. O cultivo da chia no Brasil: futuro e perspectivas. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, v.3, n. especial, p.161-179, 2014.

MIRANDA, F. **Guia Técnica para el Manejo del Cultivo de Chia (*Salvia hispanica*) em Nicaragua**. Sébaco: Central de Cooperativas de Servicios Múltiples Exportación e Importación Del Norte (CECOOPSEMEIN RL.), 2012. 14p.

PILON, C.; SORATTO, R.P.; BROETTO, F.; FERNANDES, A.M. Foliar or soil application of silicon alleviate water-deficit stress of potato plants. **Agronomy Journal**, v.106, n.6, p.2325-2334, 2014

POZO; S. A. **Alternativas para el control químico de malezas anuales en el cultivo de la Chía (*Salvia hispanica*) en la Granja Ecaa, provincia de Imbabura**. 2010. 113p. Tesis (Ingeniera Agropecuaria) Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, 2010.

ROUPHAEL, Y; CARDELLI, M; SCHWARZ, D; FRANKEN, P; COLLA, G. Effects of drought on nutrient uptake and assimilation in vegetable crops. In: Aroca R (ed) Plant responses to drought stress. **Springer**, p.171–195, 2012.

SANTANA, D. G; LOBO, G. A; SALOMÃO, A. N; PEREIRA, V. J. Robustness of germination analysis methods for *Copaifera langsdorffii* Desf. (fabaceae) seeds. **Bioscience Journal**, v. 32, n. 1, p. 160-171, 2016.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.M.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. Artmed, 6ª ed. Porto Alegre-RS, 888 p. 2017.

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. 2, p. 527-533, 2004

CAPÍTULO I - DISPONIBILIDADES HÍDRICAS E DOSES DE SILÍCIO NA EMERGÊNCIA E METABOLISMO FOTOSSINTÉTICO DE CHIA

Autor: Wesley Souza Prado
Orientadora: Dr^a: Silvana de Paula Quintão Scalon

RESUMO

A disponibilidade de água e a época de semeadura podem ser fatores limitantes para a cultura da chia (*Salvia hispanica* L.) tornando-se necessário mitigar os possíveis danos durante a emergência e crescimento das plantas. Assim, objetivou-se avaliar o efeito de doses de silício associado a diferentes capacidades de retenção de água e épocas do ano na emergência e metabolismo fotossintético das plantas de chia (*S. hispanica*). O experimento foi realizado a partir de duas épocas de semeadura (Ep1 e Ep2, Janeiro e Maio de 2019, respectivamente) sob quatro capacidades de retenção de água (CRA) (25, 50, 75 e 100%) combinadas com quatro doses de silício (0, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹). Avaliaram-se as características de emergência, do metabolismo fotossintético e crescimento. Observou-se que a porcentagem de emergência na Época 1 (Ep1) foi maior com o aumento da CRA, e a Época 2 (Ep2) proporcionou os melhores resultados para emergência. A capacidade de retenção de água de 100% e cultivadas em torno da dose de silício de 100,00 kg ha⁻¹ proporcionou maiores trocas gasosas e crescimento das plantas. A taxa fotossintética das plantas na Época 1 não variaram significativamente entre as doses de Si nas CRA de 50%. Na Época 2 houve a máxima concentração interna de CO₂ (*C_i*) foi observada para a CRA de 50% e a eficiência de carboxilação da rubisco (*A/C_i*) não teve efeito significativo na CRA de 50%. A época 2 proporciona os melhores resultados para emergência de chia. A capacidade de retenção de água de 100% associada à dose de silício de 100 kg/há proporcionou maior eficiência nas trocas gasosas e crescimento de plantas. O silício mitigou o déficit hídrico para número de folhas e área foliar na época 1. Para fluorescência inicial, conteúdo relativo de água nas folhas, número de folhas e área foliar na época 2.

Palavras chave: Lamiaceae, *Salvia hispanica* L., capacidades de retenção de água, épocas de semeadura

CHAPTER I - WATER AVAILABILITIES AND DOSES OF SILICON IN THE EMERGENCY AND METABOLISM PHOTOSYNTHEIC OF CHIA

Author: Wesley Souza Prado

Adviser: Dr^a: Silvana de Paula Quintão Scalón

ABSTRACT

The availability of water and the sowing time can be limiting factors for the cultivation of chia (*Salvia hispanica* L.) making it necessary to mitigate the possible damage during and emergence and growth of plants. Thus, the objective was to evaluate the effect of silicon doses associated with different water retention capacities and times of the year in the emergence and photosynthetic metabolism of chia plants. The experiment was carried out from two sowing times (Ep1 and Ep2, January and May 2019, respectively) under four water retention capacities (CRA) (25, 50, 75 and 100%) combined with four doses of silicon (0, 100, 150 and 200 kg ha⁻¹). The characteristics of emergence, photosynthetic metabolism and growth were evaluated. It was observed that the percentage of emergencies in Season 1 (Ep1) was higher with the increase in CRA, and Season 2 (Ep2) provided the best results for emergencies. The water retention capacity of 100% and grown around the 100.00 kg ha⁻¹ silica dose provided greater gas exchange and plant growth. The photosynthetic rate of plants in season 1 did not vary significantly between doses of Si in CRA by 50%. In season 2, the maximum internal concentration of CO₂ (Ci) was observed for the 50% CRA and the rubisco carboxylation efficiency (A / Ci) had no significant effect on the 50% CRA. Season 2 provides the best results for chia emergence. The 100% water retention capacity associated with the 100 kg ha⁻¹ silicon dose provided greater efficiency in gas exchange and plant growth. Silicon mitigated the water deficit for number of leaves and leaf area in season 1. For initial fluorescence, relative water content in leaves, number of leaves and leaf area in season 2.

Keywords: Lamiaceae, *Salvia hispanica* L., water retention capacities, sowing times

INTRODUÇÃO

A chia é espécie de dia curto, com a indução floral e o crescimento das plantas regulados pela temperatura do ar (JAMBOONSRI et al., 2012; BAGINSKY et al., 2014;). Com fotoperíodo crítico de 12 horas, ou seja, semeaduras muito tardias encurtam o ciclo de desenvolvimento e semeaduras muito precoces alongam o ciclo da cultura, podendo resultar em plantas muito altas e com índice de colheita baixo (BAGINSKY et al., 2014).

A espécie é cultivada nos meses de outubro e novembro, onde encontra condições favoráveis ao desenvolvimento, atingindo produtividades de 800 kg ha⁻¹. Entretanto, no Brasil vem sendo cultivada na época de safrinha, ou seja, o plantio ocorre de março a abril, período o qual observasse redução da disponibilidade hídrica, sendo conduzida até o final de agosto (MIGLIAVACCA et al., 2014).

A faixa de temperaturas do ar para crescimento da chia situa-se entre 11°C (temperatura mínima) e 36°C (temperatura máxima), com faixa ótima entre 16°C e 26°C (BOCHICCHIO et al., 2015). A resposta ao fotoperíodo somada a resposta a temperatura do ar fazem o ciclo da cultura variar de 90 a 180 dias (JAMBOONSRI et al., 2012). Assim, esses fatores ambientais podem influenciar diretamente a duração da fase vegetativa e o ciclo de desenvolvimento da cultura, além, do número e a velocidade de emissão de folhas e, conseqüentemente, a produção de biomassa e a produtividade de grãos de chia (HEINEMANN et al., 2006).

A disponibilidade de água é um dos fatores que mais afetam a emergência das sementes, sendo a principal responsável por reativar o metabolismo e esta envolvida direta e indiretamente em todas as etapas iniciais de crescimento, como redução da velocidade e porcentagem de germinação. Nas plantas, o estresse causado pelo déficit de água afeta o potencial hídrico das folhas e pode alterar a atividade das suas trocas gasosas, uma vez que o conteúdo total de água das células e dos tecidos vegetais está abaixo da máxima hidratação (TAIZ et al., 2017). Algumas respostas ao déficit hídrico são comumente observadas, tais como o fechamento estomático e a conseqüente diminuição da fotossíntese e da transpiração, além de danos às membranas dos tecidos, a perda de pigmentos relacionados à fotossíntese e o comprometimento dos processos de fixação e assimilação do gás carbônico (CAMPELO et al., 2015).

Algumas plantas, para assegurar a resistência ao estresse hídrico, apresentam alterações morfofisiológicas, tais como a redução da condutância estomática, diminuição da área foliar, desenvolvimento de sistemas radiculares extensos, maiores índices de raiz/parte aérea, além de mecanismos fisiológicos, bioquímicos e moleculares que incluem a expressão de genes e acúmulo de proteínas (LISAR et al. 2012).

A tolerância das plantas superiores ao déficit hídrico tem sido estimulada pelo silício (Si). Alguns benefícios como a maior tolerância das plantas superiores ao déficit hídrico devido ao aumento da ação das defesas antioxidantes, redução do dano oxidativo às moléculas funcionais e membranas, e manutenção de sistemas fisiológicos, bem como dos processos fotossintéticos sob condições de déficit hídrico, fazendo com que o elemento atue como agente mitigador do efeito estressante do déficit hídrico (ZHU et al. 2004, GONG et al. 2005).

O Si é absorvido pelas raízes das plantas na sua forma neutra, como ácido monossilícico (H_4SiO_4), através de um processo passivo regulado pela transpiração, via xilema, juntamente com a água (fluxo de massa), ou por um processo ativo, através de transportadores específicos situados na membrana plasmática das células das raízes. O transporte à longa distância nas plantas é limitado aos vasos do xilema e grandes quantidades de Si são depositadas na parede celular desses vasos. Este fato pode ser importante para prevenir a compressão dos vasos xilemáticos quando a taxa de transpiração é elevada. O Si absorvido se acumula nos tecidos mais velhos da planta, principalmente nas paredes das células da epiderme, como ácido monossilícico polimerizado ou sílica amorfa ($SiO_2.nH_2O$), que contribui substancialmente para o fortalecimento da estrutura da planta (MITANI e MA, 2005).

O acúmulo de silício nas folhas das plantas também provocam redução na transpiração e faz com que a exigência de água pelas plantas seja menor, devido à formação de uma dupla camada de sílica, o que causa redução da transpiração por diminuir a abertura dos estômatos limitando a perda de água (OLIVEIRA e CASTRO, 2002).

Chakraborty et al. (2015) ressaltam que alterações morfofisiológicas e bioquímicas podem ocorrer na planta em consequência do déficit hídrico, diferindo de uma espécie para outra. Estas alterações incluem redução na área foliar, fechamento estomático, redução do potencial hídrico, inibição fotossintética, abscisão foliar,

desestabilização de membranas e proteínas, acúmulo de EROs e crescimento do sistema radicular.

Ming et al. (2012) estudando a cultura do arroz afirmam que a aplicação de silício poderia aumentar a resistência das raízes ao estresse hídrico, impedindo o declínio das atividades fisiológicas e bioquímicas em raízes.

Considerando o fato de que o déficit hídrico pode ocasionar danos ao aparato fotossintético e ao crescimento vegetativo, objetivou-se com este estudo avaliar o efeito de doses de silício associadas a diferentes capacidades de retenção de água nas respostas germinativas e morfofisiológicas de chia a fim de testar a hipótese de que o silício atua na mitigação do déficit hídrico dessa espécie.

MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados na casa de vegetação da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD situada a latitude de 22°11'43"S, longitude de 54°56 08"W e altitude de 458 m. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é Mesotérmico Úmido do tipo Cwa, com temperaturas e precipitações médias anuais variando de 20 a 24°C e de 1250 mm a 1500 mm (FITZ e FISH et al., 2006).

Para avaliar o efeito de diferentes doses de silício sob diferentes capacidades de retenção de água (CRA) na emergência de chia, as sementes foram semeadas em duas épocas independentes, sendo a primeira no dia 28 de janeiro de 2019 e a segunda no dia 8 de maio de 2019, sendo caracterizadas como Época 1 (Ep1) e Época 2 (Ep 2). A semeadura ocorreu em vasos de 4 kg a uma profundidade de cinco centímetros, utilizando como substrato Latossolo Vermelho Distroférrico (peneirado), advindo de área anualmente cultivada, posteriormente mantidas em casa de vegetação, sob tela de sombreamento de 30% e proteção adicional de cobertura plástica (SANTOS et al., 2013).

Para cada época de semeadura, o delineamento foi inteiramente casualizado em esquema fatorial (4x5), sendo quatro capacidades de retenção de água (CRA) (25, 50, 75 e 100%) e cinco doses de silício (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹), com 4 repetições de 10 sementes por vaso, as quais foram desbastadas após as avaliações iniciais de emergência, permanecendo duas plantas por vaso. A CRA foi obtida segundo metodologia descrita por Souza et al. (2000), onde a CRA de 100% foi determinada por meio do conteúdo de água retida após o escoamento e as CRA de 25, 50 e 75%, obtidas por meio de regra de três simples em função do peso. Todos os vasos foram pesados e a irrigação individualizada realizada a cada dois dias, com água na quantidade suficiente para atingir o peso pré-estabelecido para cada tratamento. A fonte de silício utilizada foi o ácido silício precipitado puríssimo da Merck (99%; SiO₂ . H₂O), aplicado via solo e incorporado dois dias antes da semeadura. Os tratamentos não foram submetidos à adubação de base. As temperaturas referentes às duas épocas de semeadura estão relacionadas do quadro 1.

QUADRO 1. Temperaturas em °C referentes às duas épocas de semeadura, Janeiro e Maio de 2019, Época 1 e Época 2, respectivamente.

Época	Ep 1	Ep 2
	26,20	25,50
	29,00	20,80
	25,57	17,03
	26,80	20,83
	27,90	23,30
	23,97	16,47
	24,27	22,43
	23,17	24,77
	27,77	19,70
	26,10	17,10
	24,67	20,90
	26,93	21,53
	26,80	23,30
	25,87	22,38
	24,27	-
	24,20	-
	24,07	-
	22,17	-
	25,73	-
	25,50	-
	25,23	-
	24,07	-
	23,23	-
	20,83	-
	23,20	-
	24,67	-
	24,83	-
Média	25,07	21,15

A porcentagem de emergência (E%) foi determinada pelo o número de plantas emergidas até o momento que houve estabilização, sendo os resultados calculados de acordo com adaptado por Laboriau e Valadares (1976): $E = (N/A).100$, em que: E – emergência, N - número total de sementes germinadas, A - número total de sementes colocadas para germinar. Índice de velocidade de emergência (IVE): calculado pelo somatório do número de plantas emersas cada dia, dividido pelo número de dias corridos entre a semeadura e a emergência, de acordo com a fórmula de Maguire (1962). $IVE = (E1/N1) + (E2/N2) + (E3/N3) + \dots + (En/Nn)$, em que: IVE= Índice de

velocidade de emergência. $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$ = número de plantas computadas na primeira, segunda, terceira e última contagem; $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$ = número de dias da sementeira à primeira, segunda, terceira e última contagem.

Aos 60 dias após a sementeira, foi realizado o desbaste das plantas permanecendo duas unidades por vaso. As avaliações fisiológicas foram realizadas 80 dias após a sementeira, sendo que a primeira (Ep1) ocorreu no dia 18 de abril e a segunda época (Ep2) no dia 29 de julho. As avaliações foram:

-Fluorescência da clorofila *a*: obtida por meio de fluorômetro portátil modelo OS-30p (Opti-Sciences Chlorophyll Fluorometer, Hudson, USA), sendo registradas as medidas de fluorescência inicial (F_0), e a eficiência quântica potencial do fotossistema II (F_v/F_m). A determinação da fluorescência foi realizada entre 8 e 11h da manhã, sendo as folhas 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.

-Índice de clorofila (SPAD - *Soil Plant Analysis Development*), determinado utilizando um medidor portátil de clorofila, Konica Minolta, modelo SPAD-502, sendo as leituras realizadas nos limbos medianos de cada folha.

-Trocias gasosas: taxa fotossintética ($A \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), transpiração foliar ($E \text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), condutância estomática ($G_s \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e concentração interna de CO_2 ($C_i \mu\text{mol mol}^{-1}$) foram quantificadas utilizando-se analisador de gases no infravermelho (IRGA), marca ADC, modelo LCi PRO (Analytical Development Co. Ltda, Hoddesdon, UK). As avaliações foram realizadas em duas folhas completamente expandida e previamente marcada de três mudas, de modo que todas as medições sejam realizadas nas mesmas plantas de cada tratamento ($N=6$), no período da manhã, entre 8 e 11 horas. A partir dos dados de trocas gasosas foram calculadas as: eficiências instantânea do uso da água ($EUA \mu\text{molCO}_2/ \text{mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$), intrínseca do uso de água ($EiUA \mu\text{molCO}_2/ \text{mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$) e carboxilação da Rubisco ($A/C_i \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}/ \mu\text{mol mol}^{-1}$) (ZHANG et al., 2001).

-Comprimento da parte aérea (CPA) e raiz (CR), obtida por meio de régua graduada e expressa em centímetros (cm). Diâmetro de colmo, obtido por meio de paquímetro digital e expressa em milímetros (mm). Contabilizaram-se o Número de folhas (NF), contando-se o número total de folhas completamente expandidas por

planta. Área foliar (AF), realizada com o aparelho LI-COR modelo LI-3100C, sendo os resultados expressos em cm^2 .

-Conteúdo relativo de água nas folhas (CRAf): foi determinado após a submissão aos regimes hídricos de acordo com a metodologia de Turner (1989), em quatro folhas de cada tratamento, segundo a expressão matemática: $\text{CRAf} = 100 \left(\frac{\text{massa fresca} - \text{massa seca}}{\text{massa saturada} - \text{massa seca}} \right)$. As folhas foram coletadas às 7 h da manhã e cortadas em 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.

-Massa frescas e secas: as plantas foram coletadas e separadas em parte aérea (MFPA) e raiz (MFR) a partir da pesagem de cada órgão fresco em balança analítica de precisão (0,0001g). Em seguida os materiais foram acondicionadas para secagem em estufa de circulação forçada de ar, regulada à 70°C por 72 horas ou até atingir massa constante, posteriormente pesadas em balança analítica de precisão (0,0001g) para determinação da Massa seca de parte aérea (MSPA) e raiz (MSR), e os resultados expressos em gramas (g).

Os dados foram submetidos à análise de variância e ao teste F a 5% de probabilidade. Quando significativos às médias da CRA nas variáveis de emergência foram ajustados por meio da análise de regressão, posteriormente as outras variáveis, onde os tratamentos que continham 25% da CRA não se desenvolveram e não progrediram no crescimento, foram comparadas pelo teste de Tukey. As médias dos níveis de silício e as interações entre os fatores foram ajustados por meio da análise de regressão, até o nível de 5% de probabilidade. Os dados foram analisados com o auxílio do programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A porcentagem de emergência (E%) de chia foi influenciada em função das capacidades de retenção de água no solo (CRA), em ambas as épocas de semeadura. Observou-se na Ep1 aumento da E% conforme maiores disponibilidades hídricas, alcançando a 57,4% com 100% CRA, enquanto que na Ep2 ocorreu redução, nessas mesmas condições foram observados valores altos para emergência da cultura, os quais variaram de 97,66 % na CRA de 25% até 87,66% em 100% CRA (Figura 1a, b).

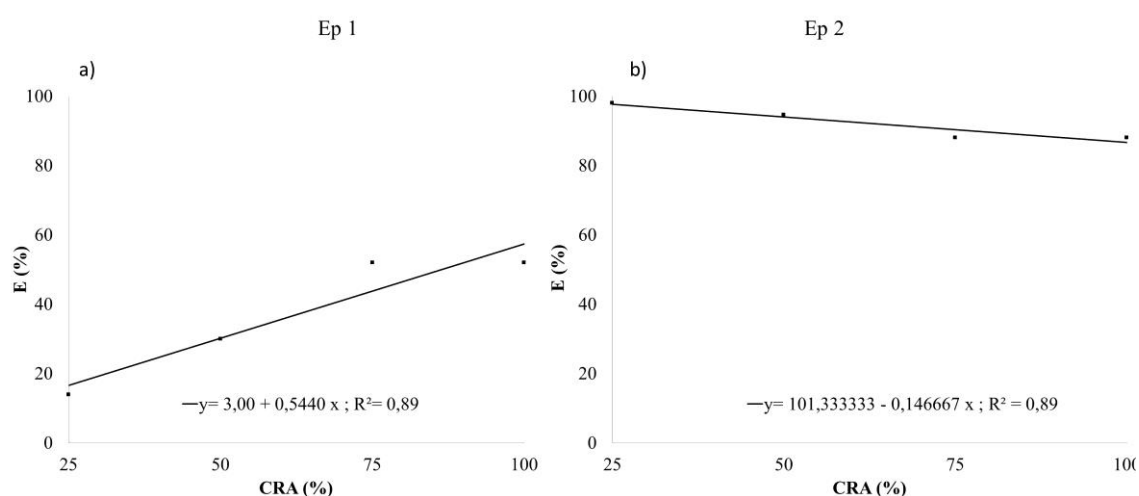


FIGURA 1. Emergência (E%) na Época 1 (a) e Época 2 (b) de plantas de Chia (*Salvia hispanica* L.) em função de diferentes doses de silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019.

Os resultados observados na Ep1 estão associados ao fato que nesse período ocorreram temperaturas de 21 a 31°C, sendo mais elevadas comparadas ao Ep2. De acordo com Stefanello et al. (2015) as maiores porcentagens de emergência ocorreram na temperatura constante de 20°C.

A elevação das temperaturas possivelmente proporcionaram maiores taxas de evaporação de água no substrato, especialmente daqueles sob 25% da CRA, o que ocasionou redução do potencial de expressão germinativo e emergência das plântulas na Ep1. Isso porque sob baixo status hídricos no solo ocorre redução das condições de embebição (PEREIRA et al., 2012).

No que concerne a Ep2, os dados observados corroboram com as informações de Stefanello et al. (2017) que descreveram que as sementes da espécie desenvolve melhor em solos drenados. Assim, diferente da Ep1, ocorreram menores temperaturas e possivelmente manutenção da umidade do solo, mesmo sob 25% da CRA.

Quanto ao índice de velocidade de emergência (IVE) observou-se interação entre as doses de silício e as CRA, em ambas épocas (Figura 2a, b). Observamos nas duas épocas os maiores IVE ocorrem na ausência de Si (0 kg ha⁻¹), sendo que na Ep1 o maior IVE (5,15) ocorreu nas plantas cultivadas sob 69% da CRA, enquanto que ao utilizar 150 e 200 kg ha⁻¹ de Si houve incremento linear do IVE (Figura 2 a, b).

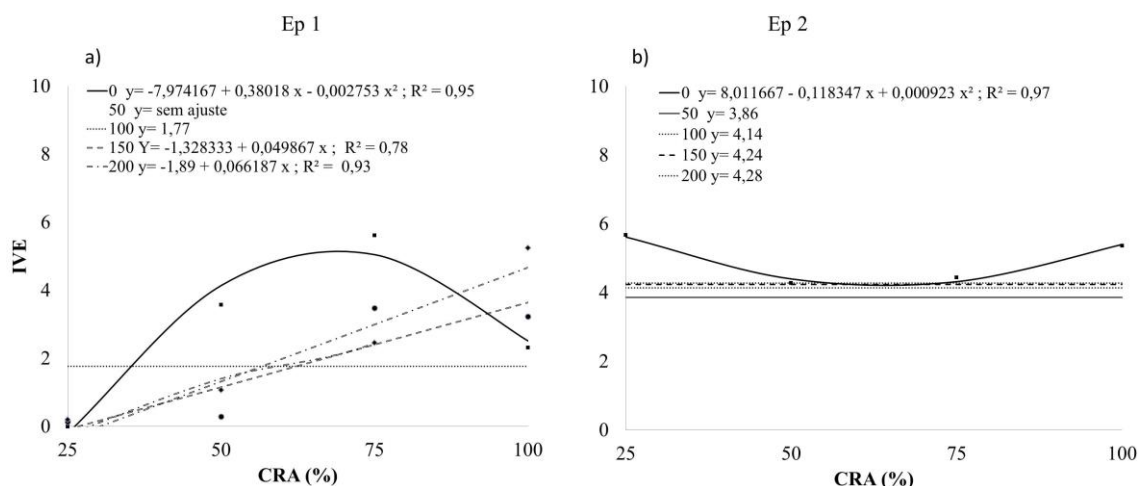


FIGURA 2. Índice de velocidade de emergência (IVE) na época 1 (a) e época 2 (b) de plantas de Chia (*Salvia hispanica L.*) em função de doses de silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019.

De maneira semelhante, Stefanello et al. (2017) e Paiva et al. (2019) observaram melhores IVE conforme aumento da disponibilidade hídrica no solo/substrato. Os autores sugerem que esse resultado é devido à restrição hídrica, que diminui a velocidade dos processos metabólicos e bioquímicos, atrasando ou reduzindo a percentagem de germinação das sementes, interferindo na embebição e no alongamento celular do embrião.

Da mesma forma, em sementes de pinhão-manso (*Jatropha curcas L.*), Pereira e Lopes (2011) observaram que, a redução da CRA do substrato reduziu

expressivamente a germinação das sementes, bem como a velocidade de germinação e o desempenho das plântulas.

A sensibilidade da chia ao déficit hídrico está associada ao fotoperíodo ou mais especificamente à temperatura ambiente nesse período, uma vez que observa-se para as características de emergência, que as condições ambientais na Ep2 proporcionaram melhores resultados mesmo em baixas disponibilidades hídricas. Atribuímos esses resultados ao fato das temperaturas média e máximas na Ep2.

As características de A , gs , EUA foram influenciadas pela interação entre os fatores nas duas épocas, enquanto que A/Ci apenas na época 2. Para E e $EiUA$ ambas na Ep2, apresentaram apenas efeito isolado das doses de Si e CRA. Verifica-se também para as características do metabolismo e crescimento que as plantas cultivadas sob 25% de CRA não se desenvolveram pois não progrediram no crescimento.

A taxa fotossintética (A) das plantas na Ep1 não variaram significativamente entre as doses de Si nas CRA de 50 e 75%, e os dados sob 100% de CRA não ajustaram aos modelos matemáticos. Quanto ao efeito do Si, as diferenças entre as CRA dentro de cada dose ocorreu somente nas doses de 0, 50 e 150 kg ha⁻¹ (Figura 3a). Na Ep2, os valores de A das plantas não variaram quando cultivadas sob 75 e 50% CRA, semelhante ao observado na Ep1, mas manteve-se maior sob 75% CRA. Entretanto, a máxima A foi de 12,4 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ nas plantas sob 100% CRA, com 124,60 kg ha⁻¹ de Si (Figura 3b).

Amin et al. (2014) estudando a aplicação de Si associada a diferentes capacidades de retenção de água em plantas de milho, verificaram que sob déficit hídrico a taxa fotossintética foi drasticamente reduzida em ambos os híbridos e verificaram que os mesmos apresentaram elevada taxa fotossintética ao aplicar doses de 100 ou 150 kg ha⁻¹ sob 100% da CRA. Esses resultados corroboram com nossos resultados na Ep2 onde, a dose em torno de 100 kg ha⁻¹ e na CRA mai elevada apresentou a taxa fotossintética superior. O aumento da taxa fotossintética pode ser o principal fator para a melhoria do crescimento induzido pelo Si sob condições estressadas e não estressadas (PARVEEN e ASHRAF, 2010).

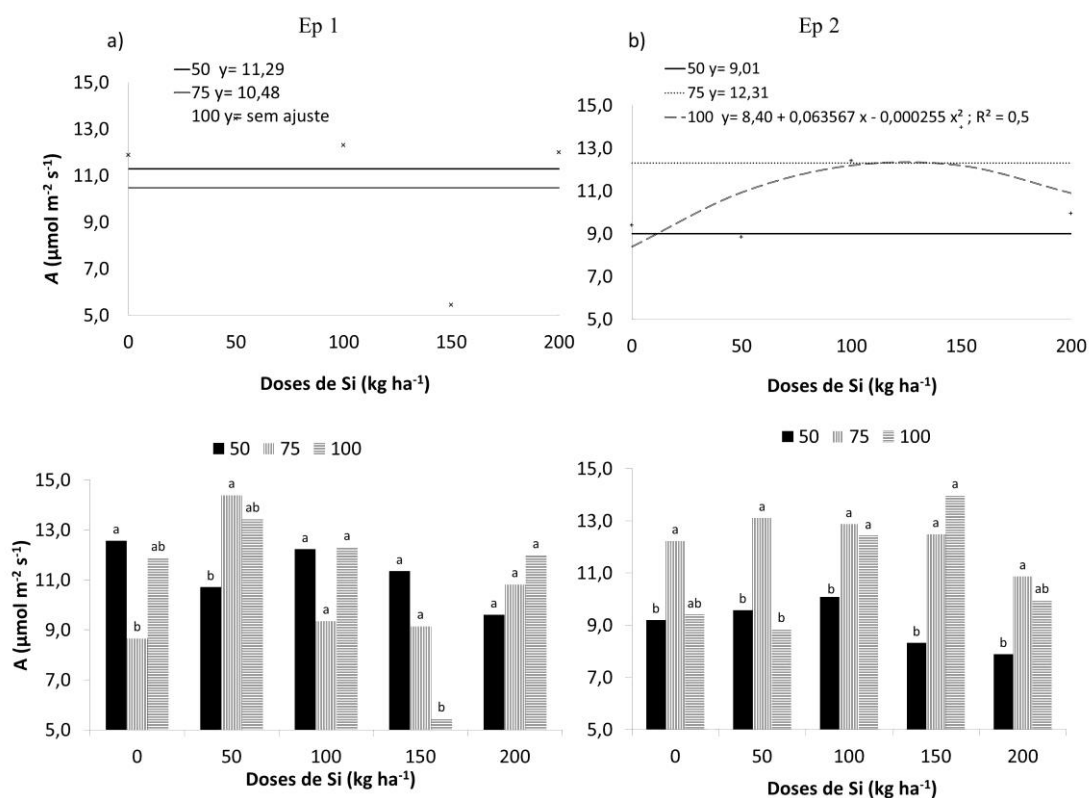


FIGURA 3. Taxa fotossintética (A) na Época 1 (a - c) e Época 2 (b - d) de plantas de Chia (*Salvia hispanica L.*) em função de diferentes doses de silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019. Letras minúsculas comparam as capacidades de retenção de água (CRA) dentro de cada dose de silício (Si). (Tukey, $p < 0,05$).

Quanto à transpiração foliar (E) na Ep1, o máximo valor observado foram nas plantas sob CRA de 75% na dose de $125,61 \text{ kg ha}^{-1}$ ($7,75 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Figura 4a).

No Ep2 houve efeito isolado das doses de Si e CRA, sendo que valor mínimo de E de $5,41 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ foi com a dose de Si de $91,03 \text{ kg ha}^{-1}$. Quanto ao efeito isolado da CRA, não foi observada diferenças entre 50 e 75%, sendo o menor resultado na CRA de 100% ($5,56 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Figura 4b e 4d).

A acumulação de Si nos órgãos de transpiração provoca a formação de uma dupla camada de sílica cuticular, a qual, pelo aumento da espessura, promove uma redução da transpiração, diminuindo a abertura dos estômatos e limitando a perda de água das plantas (FARIA, 2000). De acordo com Deren (2001) e Pereira et al. (2004), o acúmulo de silício na folha ocasiona redução na transpiração e faz com que a exigência

de água pelas plantas seja menor, devido à formação de uma dupla camada de sílica, diminuindo a abertura dos estômatos limitando a perda de água, em condições de déficit hídrico.

O silício proporcionou redução da taxa transpiratória na Ep2, demonstrando que o elemento apresenta potencial de mitigação das trocas gasosas, pois quando houve cultivo em maior CRA houve menor transpiração e quando tratado com Si até a dose de 100 kg/há também houve redução da E. A melhoria induzida pelo silício deve-se ao papel significativo do nutriente quando as plantas estão estressadas pelo déficit hídrico, indicando um efeito positivo da aplicação de Si na mitigação da seca (SHEN et al., 2010). Além disso a taxa de *E* na Ep2 também está relacionada às temperaturas mais amenas quando comparadas a Ep1, o que favoreceu menor evaporação da água no substrato, conseqüentemente maior disponibilidade hídrica para os processos metabólicos (Figura 4).

O impacto benéfico do silício das plantas está ligada à diminuição da transpiração que resulta em aumento do potencial hídrico foliar sob déficit hídrico (PEI et al., 2010).

Entretanto, esses mecanismos de absorção, distribuição e acumulação do Si estão associados a plantas acumuladoras, que contêm teores mais elevados de Si (10 a 15%), como as gramíneas, pois estas apresentam maiores tendências de acúmulo de sílica em seus tecidos. Já as não acumuladoras, como as leguminosas, podendo ser no caso da chia, contêm menores teores de Si (menos de 0,5%) a absorção de silício pode ocorrer de forma com que as plantas o absorvem sem translocá-lo (MENEGALE et al., 2015).

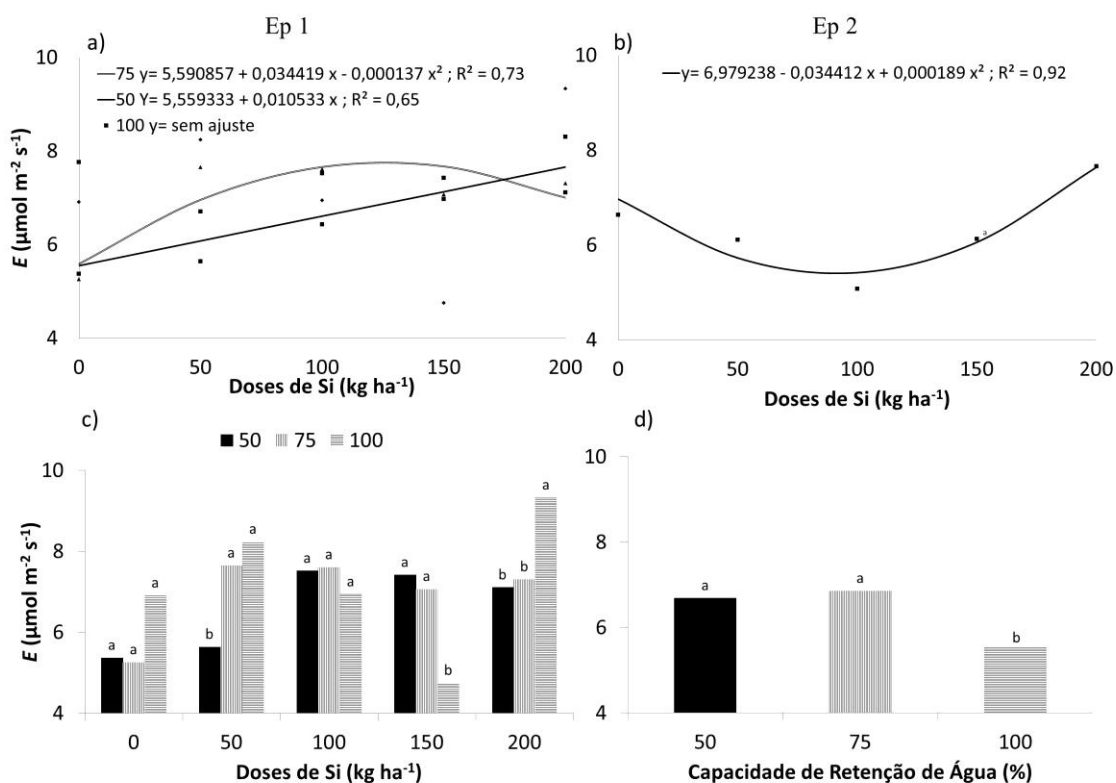


FIGURA 4. Transpiração foliar (E) na Época 1 (a – c) e Época 2 (b - d) de plantas de Chia (*Salvia hispanica* L.) em função de diferentes doses de silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019. Letras minúsculas comparam as capacidades de retenção de água (CRA) dentro de cada dose de silício (Si) (c) (Tukey, $p < 0,05$); letras minúsculas comparam as capacidades de retenção de água (d) (Tukey, $p < 0,05$).

Miyake e Takahashi (1985) acrescentam ainda que, existem outras diferenças nas plantas quanto à absorção de Si, além do seu teor na planta, referente à taxa de transporte. As plantas acumuladoras de Si apresentam alta taxa de transporte, enquanto nas plantas intermediárias o transporte é inferior, ao passo que nas plantas não-acumuladoras, o Si absorvido concentra-se nas raízes.

O silício é pouco móvel no interior das plantas, concluindo que a absorção e distribuição radial do nutriente através das raízes das leguminosas para os vasos do xilema são mais restritas a altas concentrações de silício, o que pode indicar um mecanismo efetivo de exclusão, ou seja, à medida que as raízes absorvem silício, elas também o eliminam para a solução do solo (KORNDORFER e DATNOFF, 2000).

A capacidade aprimorada das plantas tratadas com silício relacionadas às condições de déficit hídrico, tem relação com a diminuição da transpiração, devido à deposição de silício sob a cutícula. O silício é depositado como gel coloidal nos tecidos condutores, isto é, vasos do xilema e paredes celulares das folhas, restringindo o fluxo de água transpirada e, portanto, oferece um obstáculo à transpiração através da cutícula, melhorando assim o uso da água. Como consequências, a planta fica com quantidade de água interna maior, podendo fortalecer o caule e manter as folhas eretas, aumentando a penetração da luz, e melhorando a eficiência fotossintética de plantas em situação de déficit hídrico (ABDALLA, 2009).

No que se refere a concentração interna de CO₂ (*C_i*) verifica-se que não houve diferenças entre as doses de Si para a CRA de 50%. Houve diferenças significativa somente entre as CRA nas doses de 0 e 100 kg ha⁻¹, com maior *C_i* nas plantas com ausência de Si e com maior disponibilidade hídrica e menor *C_i* nas plantas com 100 kg/ha nas menores CRA (Figura 5a e 4c). Na Ep2, as máximas *C_i* foram observadas para as CRA de 50% (308,44 μmol mol⁻¹) com 99,5 kg ha⁻¹ de Si.

A menor *C_i* na Ep2 e na CRA de 100% deve-se à maior eficiência de carboxilação da Rubisco (*A/C_i*) nessa mesma condição, o que resultou na potencialização da assimilação de CO₂ (*A*). Neste sentido, a redução do *C_i* sugere a produção de fotoassimilados, uma vez que as plantas estão sendo mais eficientes na assimilação de CO₂.

Quanto a condutância estomática (*g_s*), verificamos que houve diferenças apenas na CRA de 100% na Ep1, com maior valor na dose de 0 kg ha⁻¹ (0,31 mol m² s⁻¹) e mínima na dose de 128,16 kg ha⁻¹ (0,17 mol m² s⁻¹). Diferenças significativas entre as CRA nas dosagens de 50 e 150 kg ha⁻¹ foram observadas, sendo maior nas CRA de 100 e 50%, respectivamente (Figura 6a e 6c). Os resultados observados para a dose 150 kg ha⁻¹ podem ser considerados atípicos uma vez que aumentando a dose de Si houve a maior disponibilidade de água e conseqüentemente redução da *g_s*.

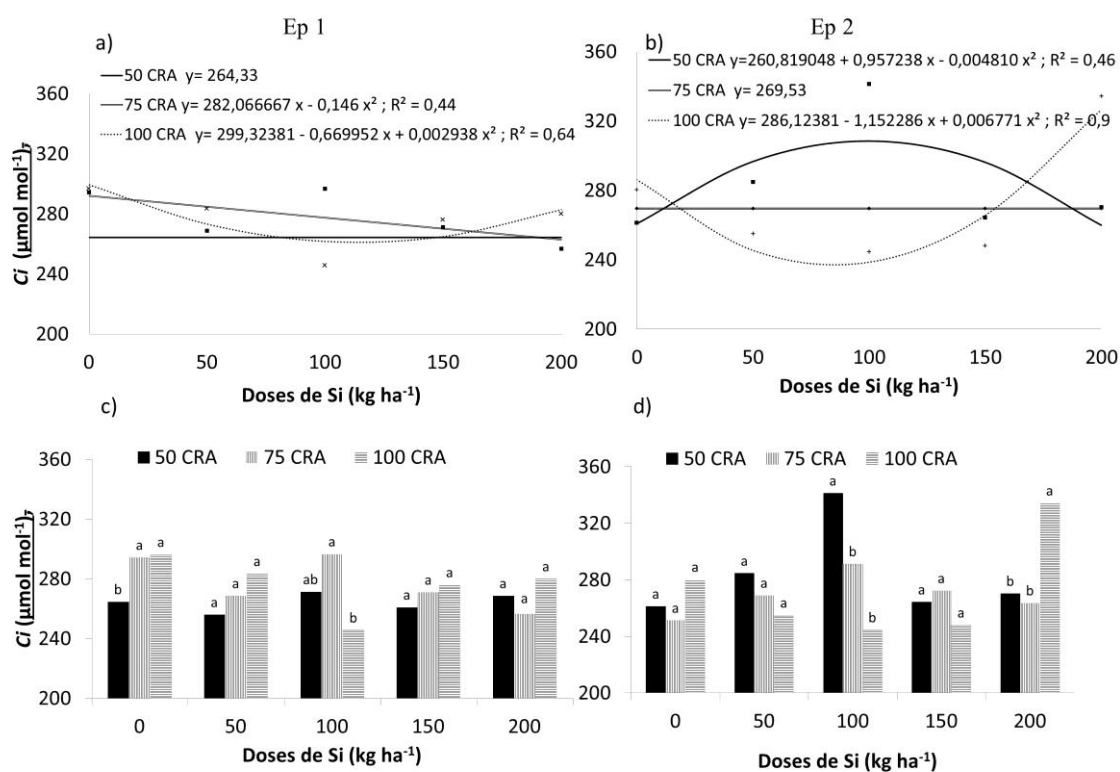


FIGURA 5. Concentração interna de CO_2 (C_i) na Época 1 (a - c) e Época 2 (b - d) de plantas de Chia (*Salvia hispanica* L.) em função de diferentes doses de silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019. Letras minúsculas comparam as capacidades de retenção de água (CRA) dentro de cada dose de silício na época 1 e 2, respectivamente (c) (d) (Tukey, $p < 0,05$).

Na Ep2, a g_s variou significativamente em todas CRA estudadas, mas com ajuste apenas para 50%, sob o qual as plantas apresentaram valores máximo na dose de $71,4 \text{ Si kg/ha}$ ($0,23 \text{ mol m}^2 \text{ s}^{-1}$). Observamos diferenças estatísticas entre as CRA para todas as dosagens, com maior G_s na CRA de 100%, com exceção da dose de 100 kg ha^{-1} . Observou-se redução da g_s conforme aumento das doses de Si nas plantas cultivadas sob CRA de 50% (Figura b). Podendo esse resultado estar relacionado à resistência estomática, a fim de manter o conteúdo relativo de água nas folhas, No entanto, ao utilizar a dose de (200 kg ha^{-1}) verificou-se aumento da E , indicando então a influência de fatores não estomáticos.

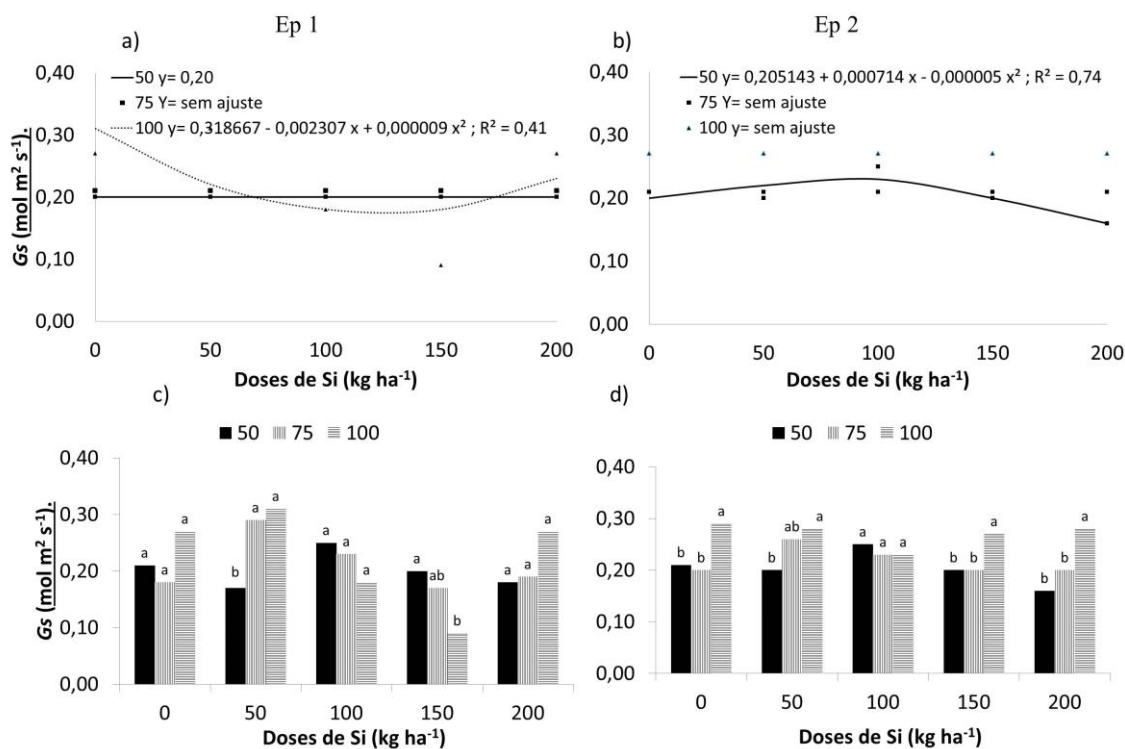


FIGURA 6. Condutância estomática (G_s) na Época 1 (a - b) e Época 2 (c - d) de plantas de Chia (*Salvia hispanica L.*) em função de diferentes doses de silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019. Letras minúsculas comparam as capacidades de retenção de água (CRA) dentro de cada dose de silício na época 1 e 2, respectivamente (c) (d) (Tukey, $p < 0,05$).

Em trabalho realizado por Scalon et al. (2011) em mudas de mutamba (*Guazuma ulmifolia* Lam.) sob diferentes capacidades de retenção de água (100%, 50%, 25% e 12,5%), verificamos que as mudas sob menor disponibilidade de água apresentaram redução na condutância estomática, fotossíntese e transpiração, sendo os quais atribuído ao fechamento estomático. Resultados semelhantes também foram observados em mudas de copaiba (*Copaifera langsdorffii* Desf.) cultivado em quatro diferentes capacidades de retenção (CRA - 25%, 50%, 75% e 100%), de modo que a CRA de 25% afetou negativamente as atividades fotossintéticas (ROSA et al., 2017).

A máxima A/C_i foi de $0,047 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} / \mu\text{mol mol}^{-1}$ nas plantas cultivadas com $98,75 \text{ kg ha}^{-1}$ de Si sob CRA de 100%, enquanto que nas demais capacidades de retenção de água não observamos efeitos significativos, com médias de 0,03 e 0,04 nas CRA de 50 e 75%, respectivamente. (Figura 7a e 7b).

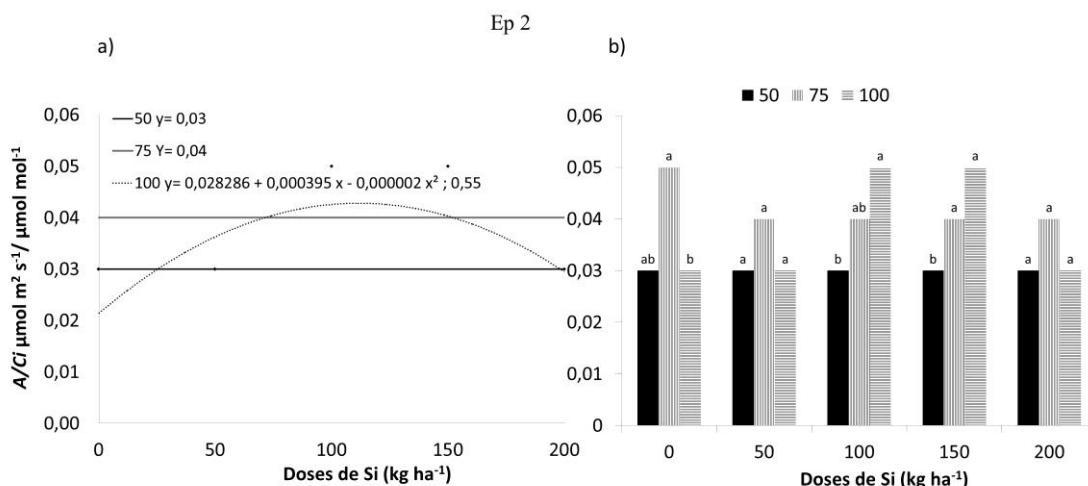


FIGURA 7. Eficiência de carboxilação da Rubisco (A/C_i) na Época 2 (a - b) de plantas de Chia (*Salvia hispanica L.*) em função de diferentes doses de silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019. Letras minúsculas comparam as capacidades de retenção de água (CRA) dentro de cada dose de silício na época 2, respectivamente (b) (Tukey, $p < 0,05$).

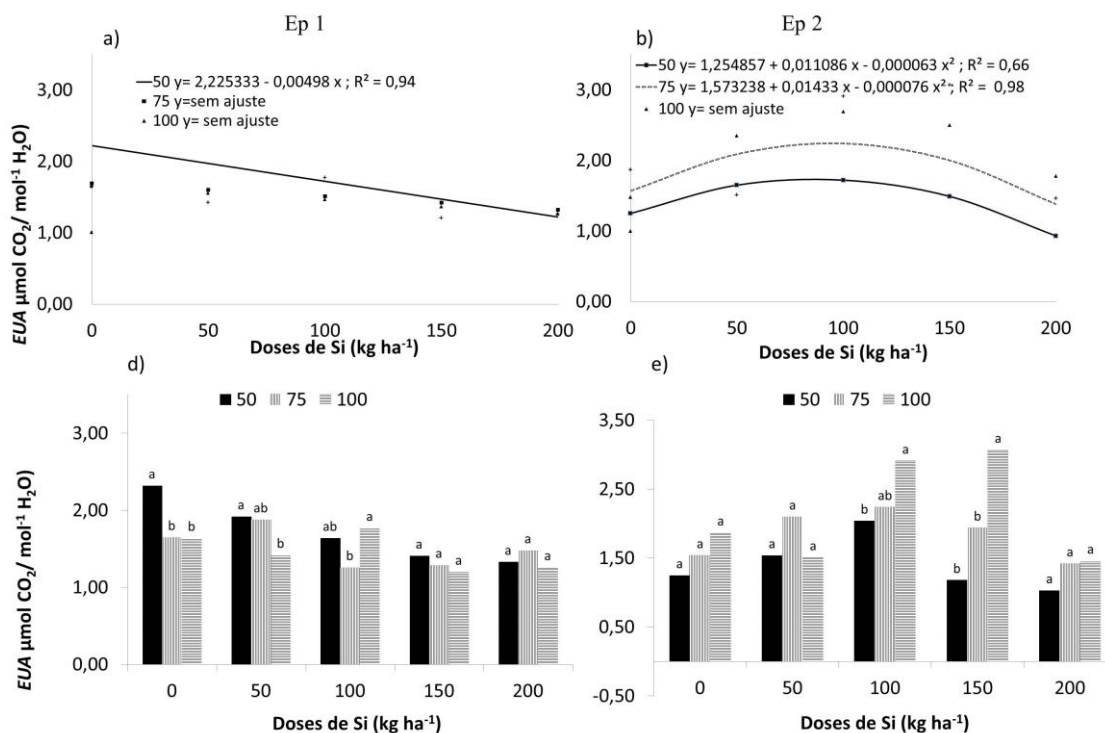


FIGURA 8. Eficiência instantânea do uso da água (EUA) na Época 1 (a - c) e Época 2 (b - d) de plantas de Chia (*Salvia hispanica L.*) em função de diferentes doses de silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019. Letras minúsculas comparam as capacidades de retenção de água (CRA) dentro de cada dose de silício na época 1 e 2, respectivamente (c) (d) (Tukey, $p < 0,05$).

Quanto a eficiência instantânea do uso da água (*EUA*) notamos que houve feito em todas as CRA, contudo na Ep1 houve ajuste apenas na CRA de 50%, na qual as plantas apresentaram maior *EUA* sem a aplicação de Si ($2,22 \mu\text{mol CO}_2/\text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$). Para a Ep2 na CRA de 50% a máxima foi de $1,74 \mu\text{mol CO}_2/\text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ na dose de $87,98 \text{ kg/há.}$ (Figura 8a, b, c, d).

A eficiência intrínseca do uso de água (*EiUA*) na Ep1, foi influenciada pela interação entre os fatores em estudo, sendo que sob CRA de 50 e 75% as médias foram de $57,85$ e $50,57 \mu\text{mol CO}_2/\text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$. Os dados da *EiUA* sob CRA 100% não ajustaram-se aos modelos matemáticos testados (Figura 9a). Por outro lado, na época 2 verificamos maiores valores de *EiUA* nas plantas cultivadas sob 75% da CRA, independente das doses (Figura 9b).

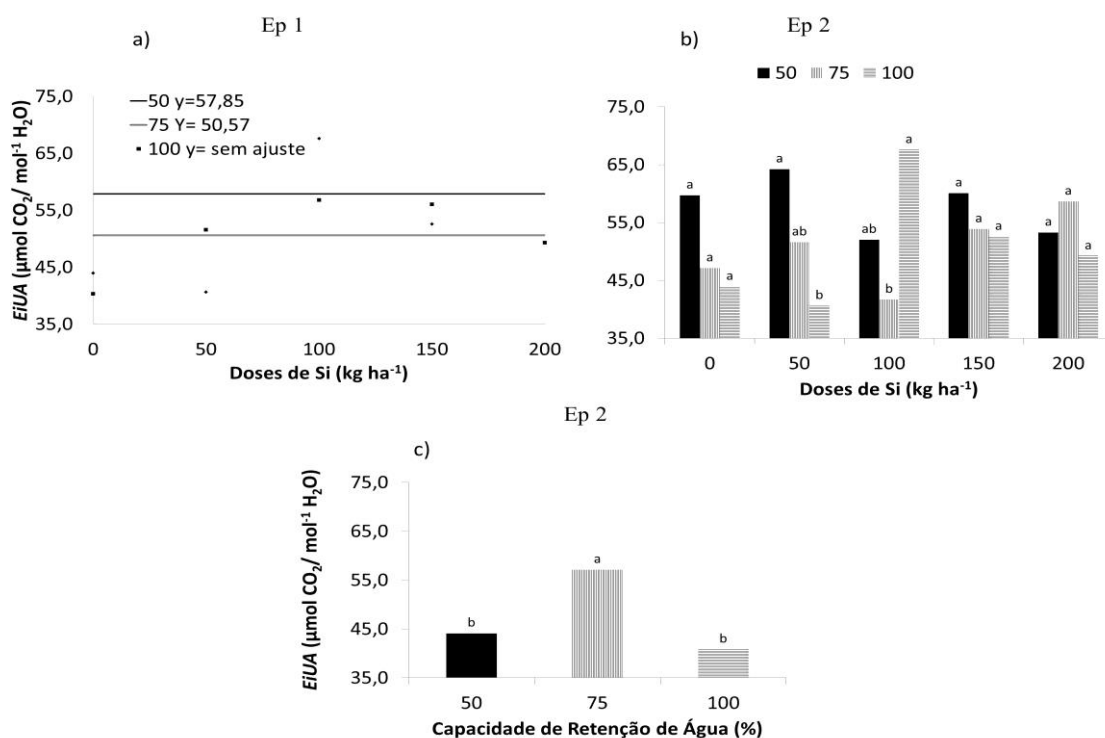


FIGURA 9. Eficiência intrínseca do uso da água (*EiUA*) na Época 1 (a - b) e Época 2 (c) de plantas de Chia (*Salvia hispanica L.*) em função de diferentes doses de silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019. Letras minúsculas comparam as capacidades de retenção de água (CRA) dentro de cada dose de silício na época 2 (b) (Tukey, $p < 0,05$). Letras minúsculas comparam as capacidades de retenção de água na época 2 (c) (Tukey, $p < 0,05$).

Em ambas as épocas, a $F0$ foi influenciada pela interação entre os fatores, sendo que na CRA de 50 e 75% não houve efeito significativo, e os dados sob CRA de 100% não ajustaram-se aos modelos matemáticos testados (Figura 10a e 10c). Na segunda época, a maior $F0$ foi de 0,17 elétrons quantum⁻¹ das plantas cultivadas sob CRA de 50% sem aplicação de Si (0 kg ha⁻¹) e redução conforme aumento gradual das doses, demonstrando o efeito da mitigação do Si para esse indicador fotoquímico. Por outro lado, as maiores disponibilidades hídricas no solo ocasionaram incremento nos valores de $F0$ na dose de 200 kg ha⁻¹, nesse mesmo período (Figura 10b e 10d).

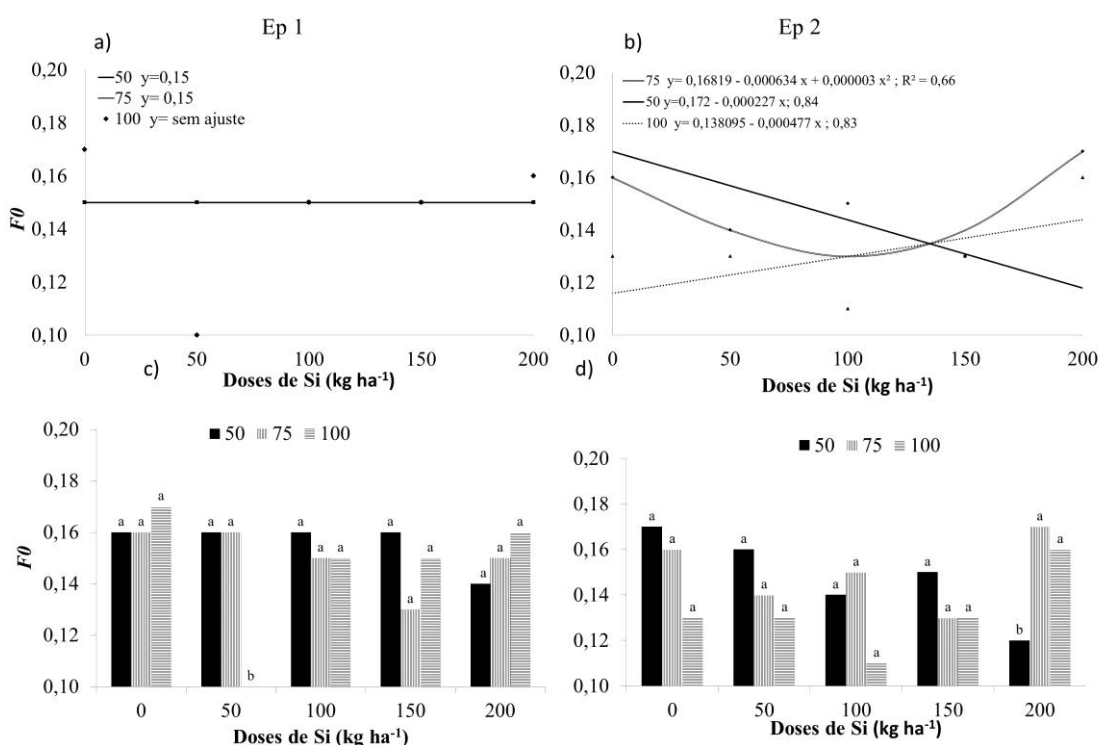


FIGURA 10. Fluorescência inicial ($F0$) na Época 1 (a - c) e Época 2 (b - d) de plantas de Chia (*Salvia hispanica* L.) em função de diferentes doses de silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019. Letras minúsculas comparam as capacidades de retenção de água (CRA) dentro de cada dose de silício na época 1 e 2, respectivamente (c) (d) (Tukey, $p < 0,05$).

De acordo com Bolhàr-Nordenkampf e Onquist (1993), o valor da $F0$ pode aumentar quando os centros de reação do fotossistema II estão comprometidos ou a transferência da energia de excitação da antena para os centros de reação está prejudicada, ou seja, o $F0$ é um indicador da fluorescência inicial e sua intensidade afeta

os centros de reação, conseqüentemente sua eficácia, sendo que esse aumento indica possível dano na cadeia de transporte de elétrons. Assim nesse estudo evidenciou-se que tanto a baixa ou alta disponibilidade hídrica no solo são fatores limitantes para a estabilidade dos processos fotoquímicos iniciais para essa espécie.

Na eficiência fotoquímica potencial no FSII (Fv/Fm) verifica-se que a Ep1 sob 50% da CRA apresentou valor máximo de 0,67 elétrons quantum⁻¹ na dose de 70 kg ha⁻¹. Observa-se uma tendência de aumento da Fv/Fm até essa dose sob restrição hídrica, demonstrando o efeito da mitigação do Si para esse indicador fotoquímico (Figura 11a e 11c). Para Ep2 verifica-se que sob restrição hídrica (50%) houve menor Fv/Fm , independente das doses (Figura 11b e 11d).

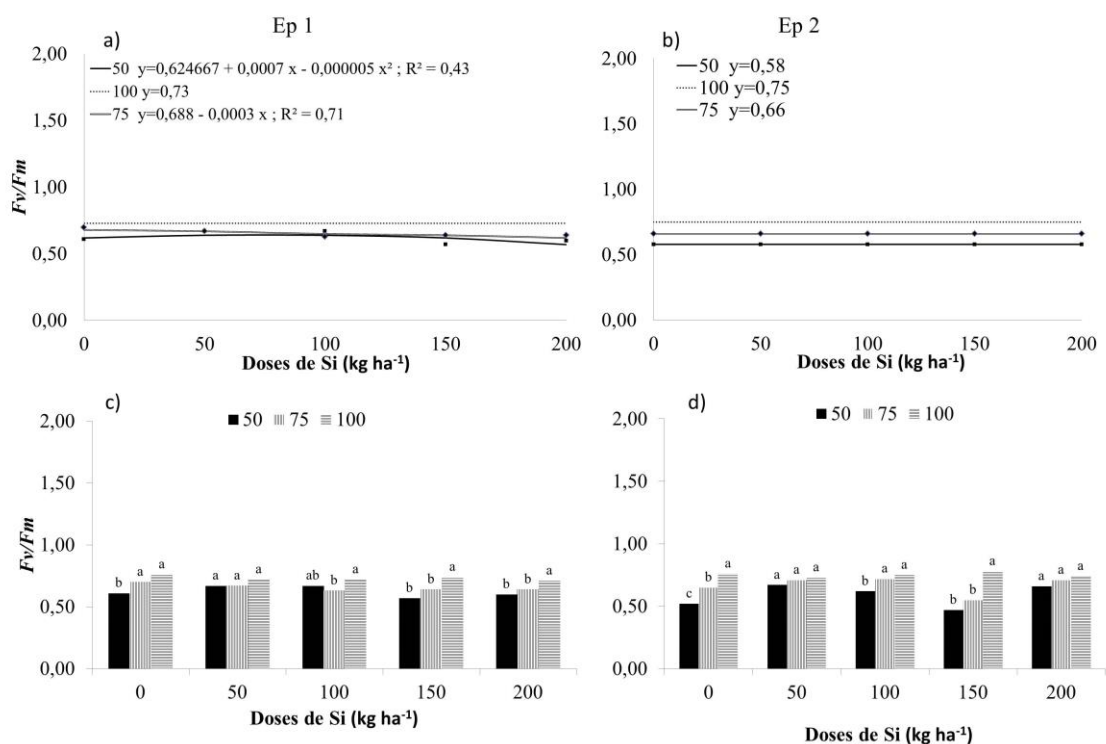


FIGURA 11. Eficiência quântica potencial do FS II (Fv/Fm) na Época 1 (a - c) e Época 2 (b - d) de plantas de Chia (*Salvia hispanica* L.) em função de diferentes doses de silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019. Letras minúsculas comparam as capacidades de retenção de água (CRA) dentro de cada dose de silício na época 1 e 2 (c) (d) (Tukey, $p < 0,05$).

A razão Fv/Fm é uma estimativa da eficiência quântica da atividade fotoquímica do PSII. Essa relação tem sido amplamente utilizada para detectar

distúrbios no sistema fotossintético causados por estresse, caracterizado como um forte parâmetro de estudo de fluorescência da clorofila *a*, já que sua diminuição indica um declínio na eficiência do PSII na fotoquímica, sugerindo dano ou perturbação no aparelho fotossintético (SCHANSKER et al., 2011).

O maior índice de clorofila ocorreu nas plantas com 200 kg ha⁻¹ (34,00 SPAD), havendo crescimento linear para Ep2 (Figura 12).

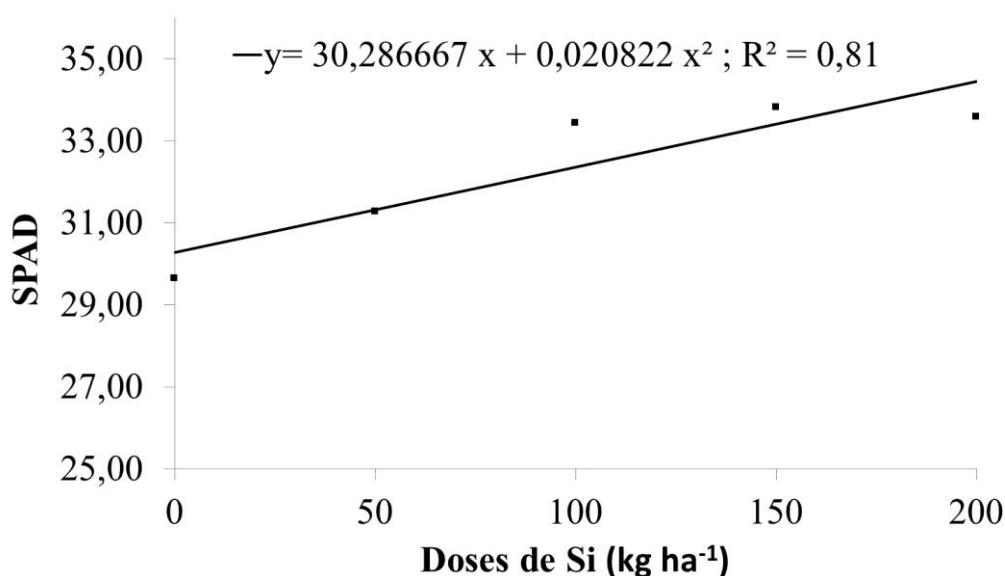


FIGURA 12. Índice de clorofila (SPAD) na Época 2 de plantas de Chia (*Salvia hispânica L.*) em função de diferentes doses de silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019.

Para Heckman (2013), esse elemento torna as células epidérmicas das folhas mais eretas, o que induz maior absorção de CO₂, em decorrência disso, há um aumento na eficiência fotossintética e no teor de clorofila. Provavelmente isto ocorre pelo acúmulo de Si na superfície foliar, servindo como barreira física e tendo um importante papel na regulação osmótica, diminuindo assim o estresse causado pelo déficit hídrico. (CANTUÁRIO et al., 2014).

Teixeira (2018) avaliando o efeito de Si via pulverização foliar e solução nutritiva, em mudas pré-brotadas de cana de açúcar sob déficit hídrico, verificou o aumento do índice de clorofila nas plantas sob restrição hídrica (30% da CRA). O índice possui forte correlação com a produção de peróxido de hidrogênio, um subproduto da

peroxidação lipídica (BARRETO et al., 2017), assim, o Si ao reduzir os danos provocados pelo déficit hídrico, proporcionou maior integridade física às membranas celulares. Portanto, essa preservação do teor de clorofila nas plantas estressadas, possivelmente, deve-se ao papel do Si na ação enzimática que diminui os danos provocados pelo estresse oxidativo, garantindo maior transferência de energia luminosa para as clorofilas e também favorecendo na proteção das plantas à condição de estresse (TAIZ et al., 2017).

Para comprimento de raiz (CR) apenas na Ep2 foi significativo para o fator isolado CRA, notando-se que sob a CRA de 100% houve maior crescimento radicular (25,93 cm) (Figura 13).

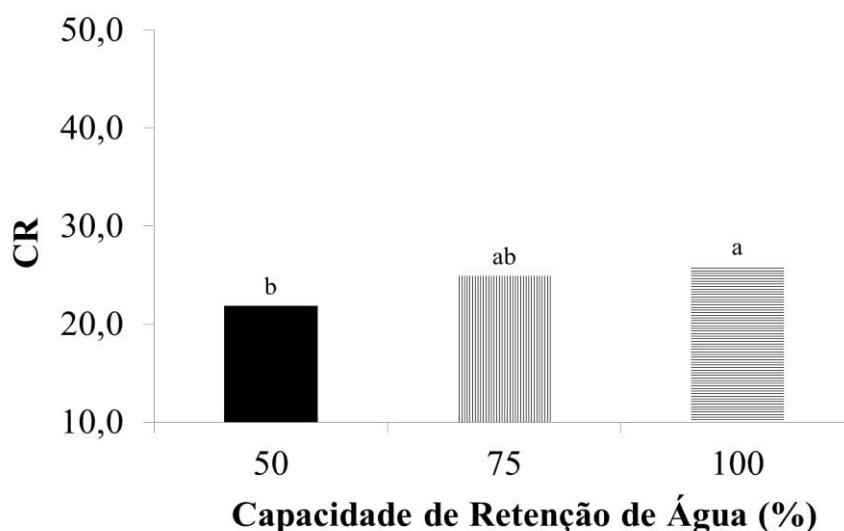


FIGURA 13. Comprimento de raiz (CR) (b) na Época 2 de plantas de Chia (*Salvia hispânica L.*) em função de diferentes doses de silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019. Letras minúsculas comparam as capacidades de retenção de água (CRA) (Tukey, $p < 0,05$).

O maior conteúdo relativo de água nas folhas (CRAf) ocorreu nas plantas sob 75% CRA na dose de Si de 200 kg ha^{-1} na Ep1. Enquanto que na época 2 foram nas folhas cultivadas com CRA de 100% associado a $178,76 \text{ kg ha}^{-1}$ de Si. Ressalta-se ainda na Ep2 que mesmo com valores baixos de CRAf verifica-se que houve aumento sob restrição hídrica quando aumentou-se o silício, mostrando o efeito de mitigação do elemento quando sob déficit hídrico (Figura 14a, b, c, d).

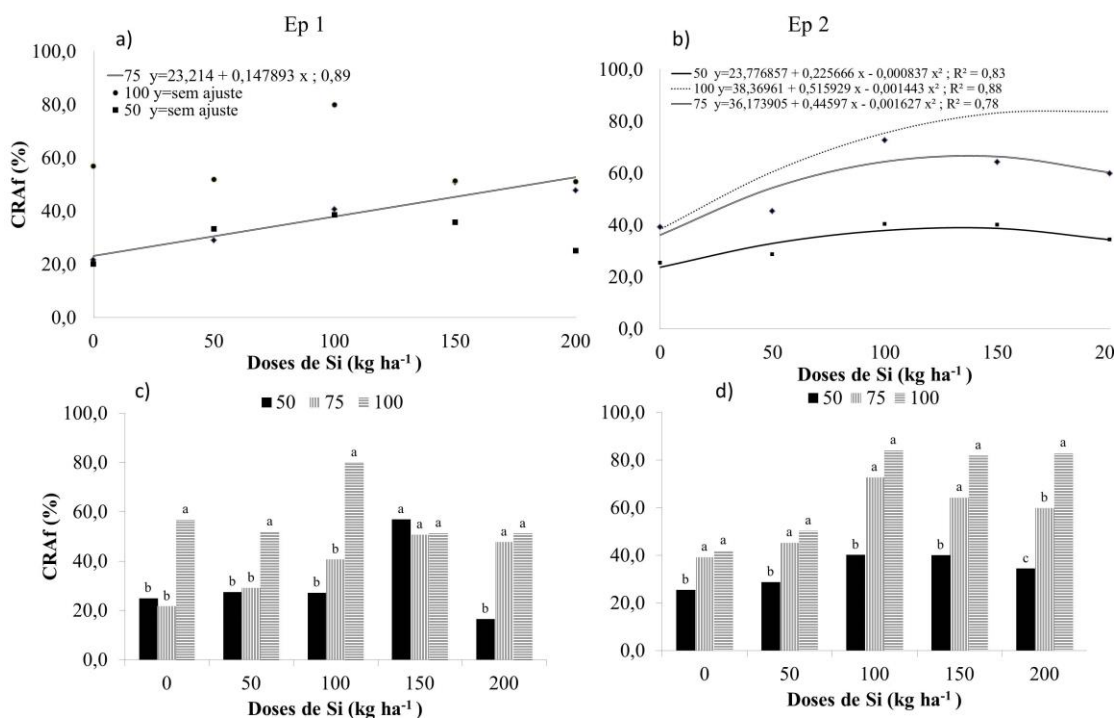


FIGURA 14. Conteúdo relativo de água nas folhas (CRAF) na Época 1 (a - c) e na Época 2 (b - d) plantas de Chia (*Salvia hispânica L.*) em função de diferentes doses de silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019. Letras minúsculas comparam as capacidades de retenção de água (CRA) dentro de cada dose de silício na época 1 e 2 (c) (d) (Tukey, $p < 0,05$).

Ao analisar o conteúdo relativo de água em folhas de feijão-caupi em diferentes estágios, Araújo et al. (2017) observaram que no estágio V₅ em condições de restrição hídrica, houve aumento de 23,33% da CRAf quando atulizado o Si. Em estágio V₉ verificou pouca variação no conteúdo de água, entre as condições pesquisadas. Nessa fase, as plantas já se encontravam possivelmente adaptadas à limitação de água no solo, o que pode ter sido potencializado pelo efeito cumulativo do Si. Essa assertiva é dada pela menor oscilação no conteúdo de água em plantas nutridas de Si, pois nessas situações os vegetais tendem a reduzir a taxa de transpiração e, conseqüentemente, há melhor aproveitamento da água disponível no solo devido à melhoria da estrutura morfofisiológica da planta (FERRAZ et al., 2015). Nessa pesquisa, mesmo na CRA de 100%, o Si reduziu os efeitos deletérios da restrição hídrica sobre o conteúdo de água, que pode ser atribuído por sua função no arranjo da dupla camada de sílica nas células epidérmicas (PEREIRA et al., 2004).

Corroborando com nossos resultados, os híbridos de milho estudados por Amin et al. (2014) também obtiveram maior conteúdo de água quando em condições de capacidades de retenção de água mais elevadas, e quando tratadas conjuntamente com silício, especificamente nas doses de 100 e 150 kg ha⁻¹, as quais foram igualmente mais eficazes, aumentando o teor relativo de água. Dessa mesma forma, nossa pesquisa com chia em ambas as épocas estudadas e doses de Si mais elevadas combinadas com as maiores CRA aumentam significativamente o conteúdo relativo de água nas plantas, ou seja, a diminuição do teor relativo de água nas folhas das plantas estressadas pelo déficit hídrico é devido à redução da água disponível no solo, assim, o sistema radicular pode não ser tão eficiente para manter a água perdida através da transpiração.

Souza et al. (2014) registraram na cultura do milho, acréscimo de 27% do CRAf sob déficit hídrico e aplicação de Si em relação ao tratamento com déficit hídrico e sem Si, atribuindo a esse aumento o depósito de sílica nos tecidos foliares e conseqüente redução na taxa de transpiração. Os autores enfatizam que déficit hídrico é responsável pela redução do conteúdo relativo de água.

O comprimento da parte aérea (CPA) foi influenciado pelo Si e CRA, isoladamente. Verifica-se que o silício provocou aumento do crescimento da parte aérea a partir de 89 kg ha⁻¹ e sob 100% da CRA (Ep1 e Ep2) (Figura 15).

Taiz et al (2017) relatam que as respostas mais proeminentes das plantas ao déficit hídrico consistem no decréscimo da redução da expansão foliar, conseqüente menor produção da área foliar, do fechamento estomático, da aceleração da senescência e da abscisão das folhas. Quando as plantas são expostas a situações de déficit hídrico exibem, frequentemente, respostas fisiológicas que resultam, de modo indireto, na conservação da água no solo, como se estivessem economizando para períodos posteriores.

De maneira semelhante, Simon et al., (2017) e Paiva (2019) estudando a mesma espécie submetida a estresse hídrico, observaram que com o aumento da restrição hídrica reduziu o crescimento radicular e da parte aérea.

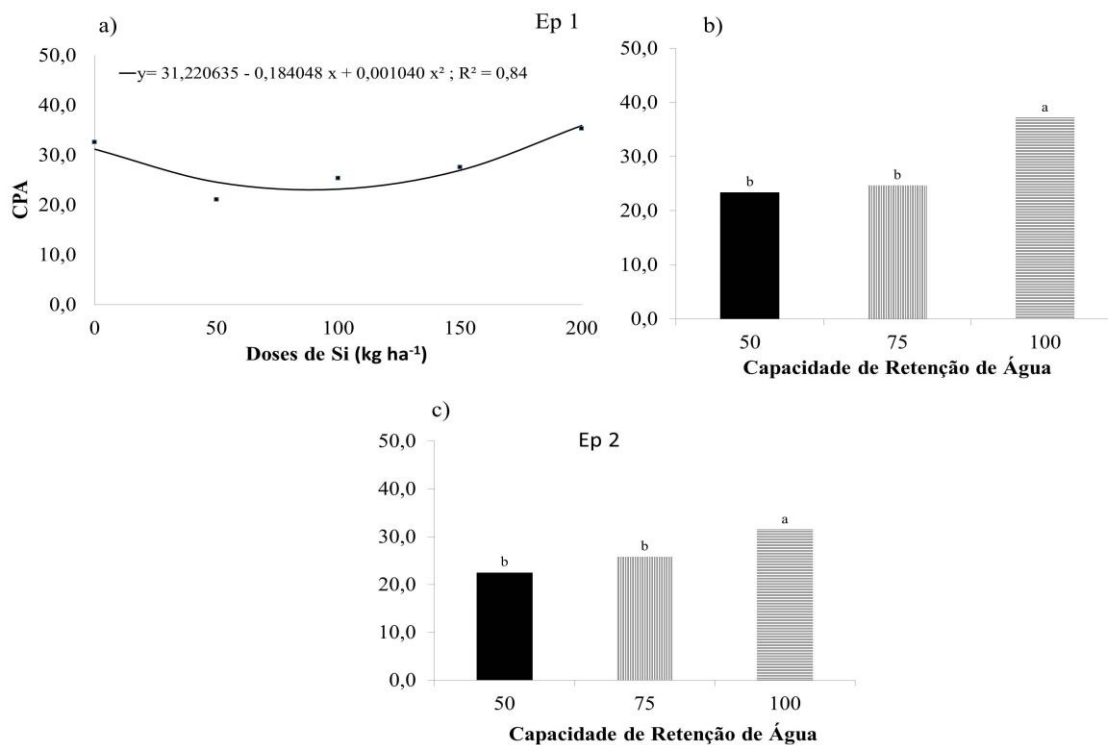


FIGURA 15. Comprimento de parte aérea (CPA) na Época 1 (a - b) e na Época 2 (c) plantas de Chia (*Salvia hispanica* L.) em função de diferentes doses de silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019. Letras minúsculas comparam as capacidades de retenção de água (CRA) na época 1 e 2 (b) e (c), respectivamente (Tukey, $p < 0,05$).

Corroborando com o presente estudo, em sementes de maxixe, Alves et al. (2017) observaram que com o aumento da restrição hídrica houve redução severa no comprimento da parte aérea, o que atribuíram ao fato do estresse hídrico afetar o processo de alongamento celular e síntese de parede celular com redução do crescimento causada pela diminuição da turgescência destas células, prejudicando a expansão celular e influenciando assim o desenvolvimento da plântula.

Quanto ao diâmetro de colmo (DC), os máximos valores ocorreram sob CRA de 50% (1,77 mm) e 100% (2,25 mm) nas doses de Si de 124,75 e 134,50 kg ha⁻¹, nas épocas 1 e 2, respectivamente (Figura 16a e 16b).

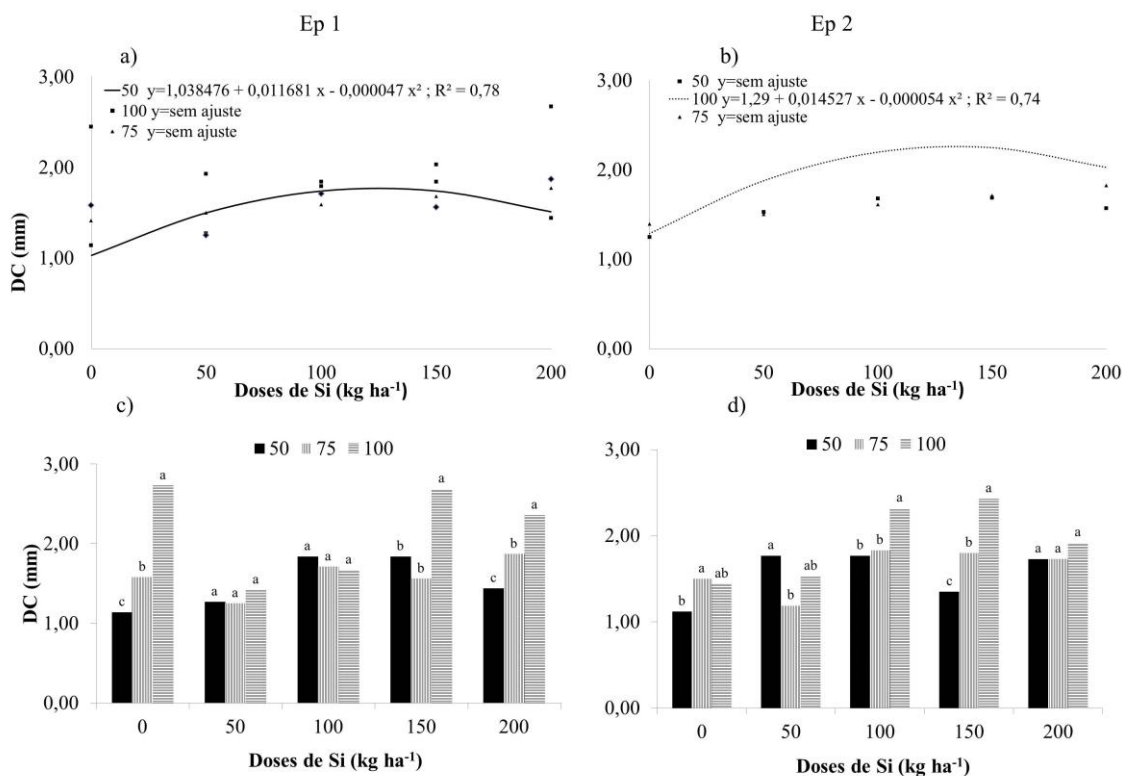


FIGURA 16. Diâmetro de colmo (DC) na Época 1 (a - c) e na Época 2 (b - d) plantas de Chia (*Salvia hispanica* L.) em função de diferentes doses de silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019. Letras minúsculas comparam as capacidades de retenção de água (CRA) dentro de cada dose de silício na época 1 e 2 (c) e (d), respectivamente (Tukey, $p < 0,05$).

As máximas áreas foliares (AF) foram de 128,82 e 114,97 cm² quando as plantas foram cultivadas nas doses de Si de 200 e 130,73 kg ha⁻¹ nas épocas 1 e 2, respectivamente, ambas sob 100% da CRA. Esses resultados estão associados aos maiores números de folhas sob essa mesma condição hídrica e com aplicação de silício. Verifica-se também quando sob restrição hídrica o Si mitigou o efeito, ou seja, em ambas as épocas quando houve aumento da dose, houve acréscimo da área foliar (Figura 17a e 17b).

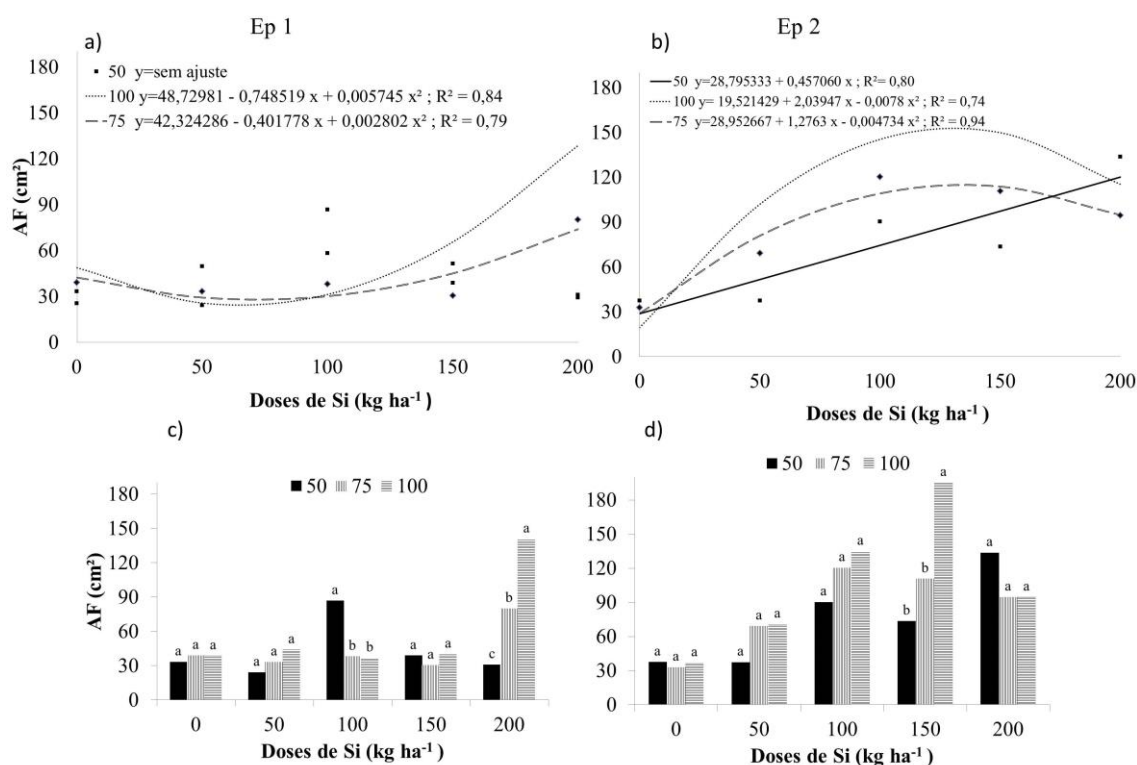


FIGURA 17. Área foliar (AF) na Época 1 (a - c) e na Época 2 (b - d) plantas de Chia (*Salvia hispanica L.*) em função de diferentes doses de silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019. Letras minúsculas comparam as capacidades de retenção de água (CRA) dentro de cada dose de silício na época 1 e 2 (c) e (d), respectivamente (Tukey, $p < 0,05$).

Corroborando com a característica analisada, Araújo et al. (2014) avaliando a aplicação foliar de silício como atenuador do déficit hídrico em genótipos de feijão-caupi, verificou que no genótipo BRS Marataoã houve redução da AF sob restrição hídrica (50% de CRA) e na ausência de Si. Este efeito foi revertido pela aplicação de Si, que proporcionou um aumento de 22,57% de AF, em relação ao tratamento sem Si. Houve maior AF nos outros genótipos, BRS Rouxinol, BRS Marataoã e Costela de Vaca, quando submetidos a 100% de disponibilidade hídrica e presença de Si, o que indica que esse elemento promoveu efeito benéfico para expansão e manutenção da área foliar nestes genótipos, e em consequência disso, aumentou a capacidade de ganho da taxa fotossintética, por meio de maior captação de energia luminosa. De maneira semelhante, o Si também propiciou ganho expressivo em área foliar no crescimento de soja (MOREIRA et al., 2010).

Ressalta-se que a redução da área foliar em alguns vegetais, com o ocorrido na chia na Ep2, em condições de deficiência hídrica, é uma estratégia para evitar gastos de energia metabólica, embora essa depleção culmine em menor crescimento e desenvolvimento vegetal (TAIZ et al. 2017).

O cultivo de chia sob CRA de 100% e doses crescentes de silício contribuíram para maiores número de folhas (18 e 20 folhas/planta) nas épocas 1 e 2, respectivamente Sob as menores disponibilidades hídricas, especialmente na CRA de 50% e na época 1 foi observado aumento do NF com aplicação de Si, mostrando o efeito do elemento na mitigação do déficit hídrico (Figura 18a e 18b).

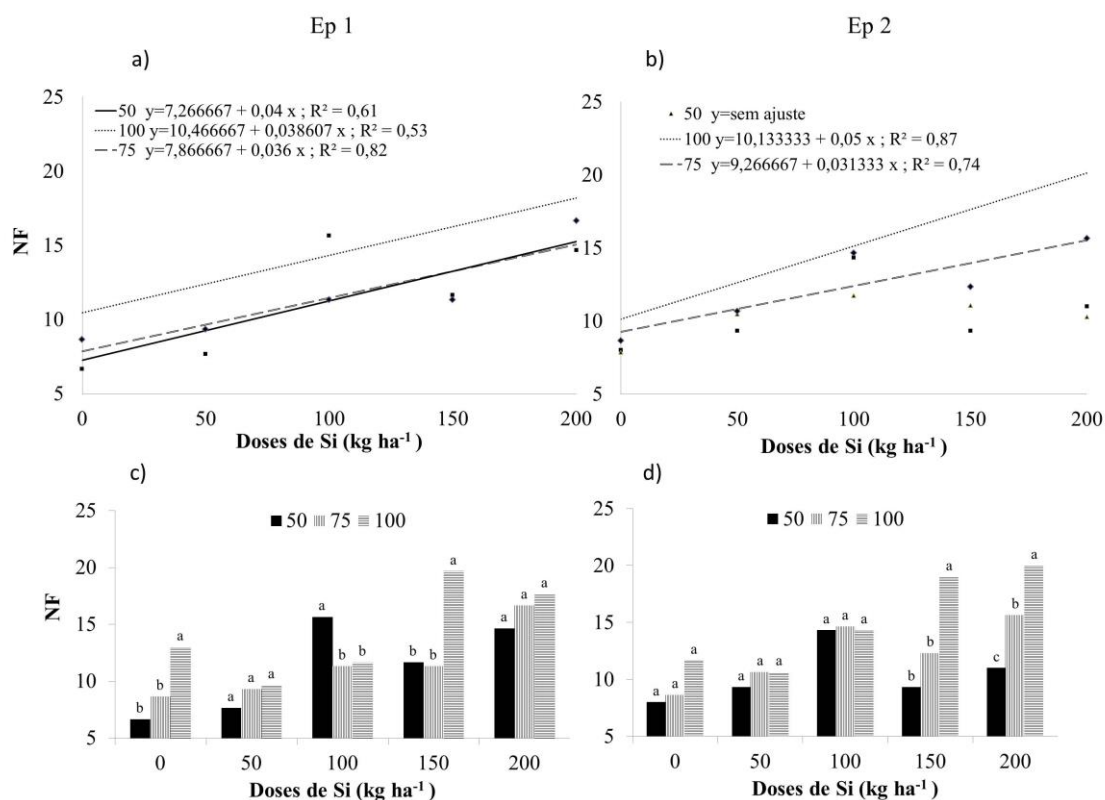


FIGURA 18. Número de folhas (NF) na Época 1 (a - c) e na Época 2 (b - d) plantas de Chia (*Salvia hispanica L.*) em função de diferentes doses de silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019. Letras minúsculas comparam as capacidades de retenção de água (CRA) dentro de cada dose de silício na época 1 e 2 (c) e (d), respectivamente (Tukey, $p < 0,05$).

Amin et al. (2014) verificaram que o estresse hídrico (60% CRA) em milho reduziu significativamente atributos como altura da planta e área foliar por planta,

devido à inibição induzida pela seca no crescimento em comparação com condições de controle (100% CRA) nos dois híbridos estudados, um tolerante e outro sensível a seca. Ambos híbridos quando submetidos a doses de Si de 100 e 150 kg ha⁻¹ apresentaram diferenças estatísticas e com maiores médias comparadas a doses inferiores para as características CPA e AF. Esses resultados corroboram com os observados no presente trabalho, onde o CPA e AF aumentaram a partir da dose de Si de 100 kg ha⁻¹, sendo os maiores valores observados na CRA de 100% .

As massas frescas (MFPA) e secas da parte aérea (MSPA) apresentaram a mesma tendência, uma vez que, na época 1 verificou-se efeito isolado das CRA, observando-se maiores valores de ambas características nas plantas cultivadas sob 100% CRA. Enquanto que na época 2 houve efeito isolado tanto do Si quanto da CRA, e os maiores valores na doses de 200 kg ha⁻¹ de Si e sob 100% CRA (Figura 19a, b, c; 20a, b, c).

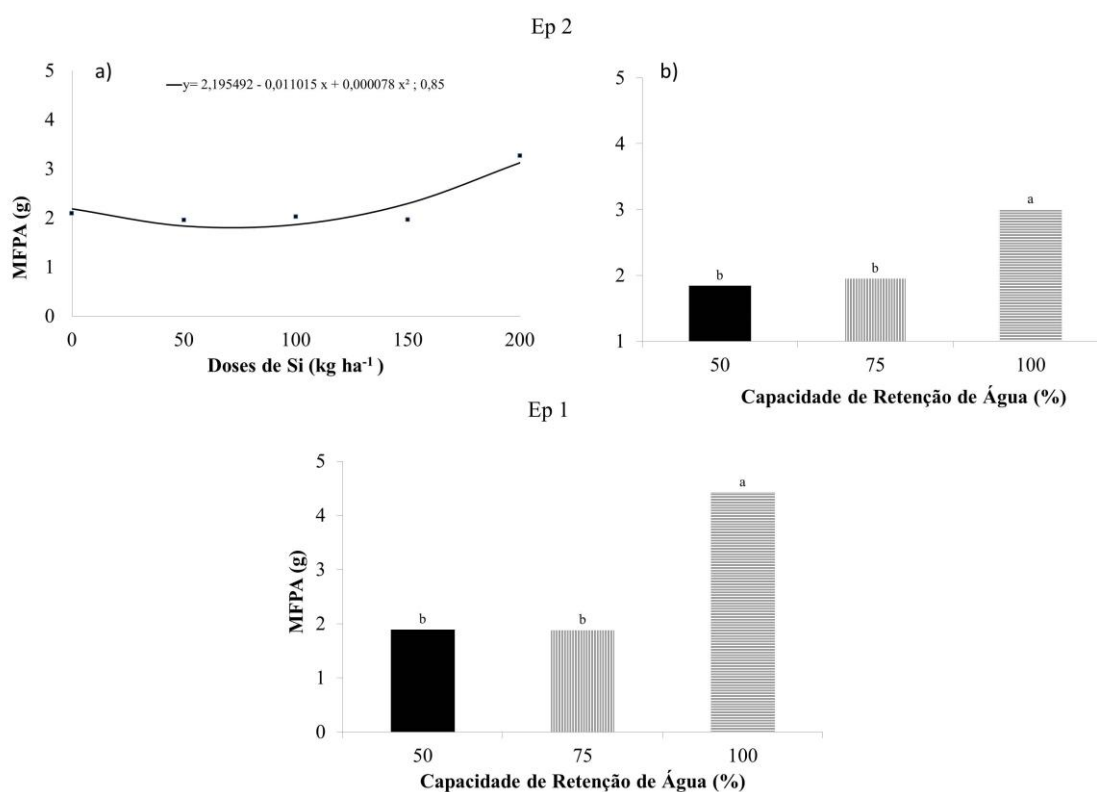


FIGURA 19. Massa fresca da parte aérea (MFPA) na Época 1 (b) e na Época 2 (a - c) plantas de Chia (*Salvia hispanica*) em função de diferentes doses de silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019.

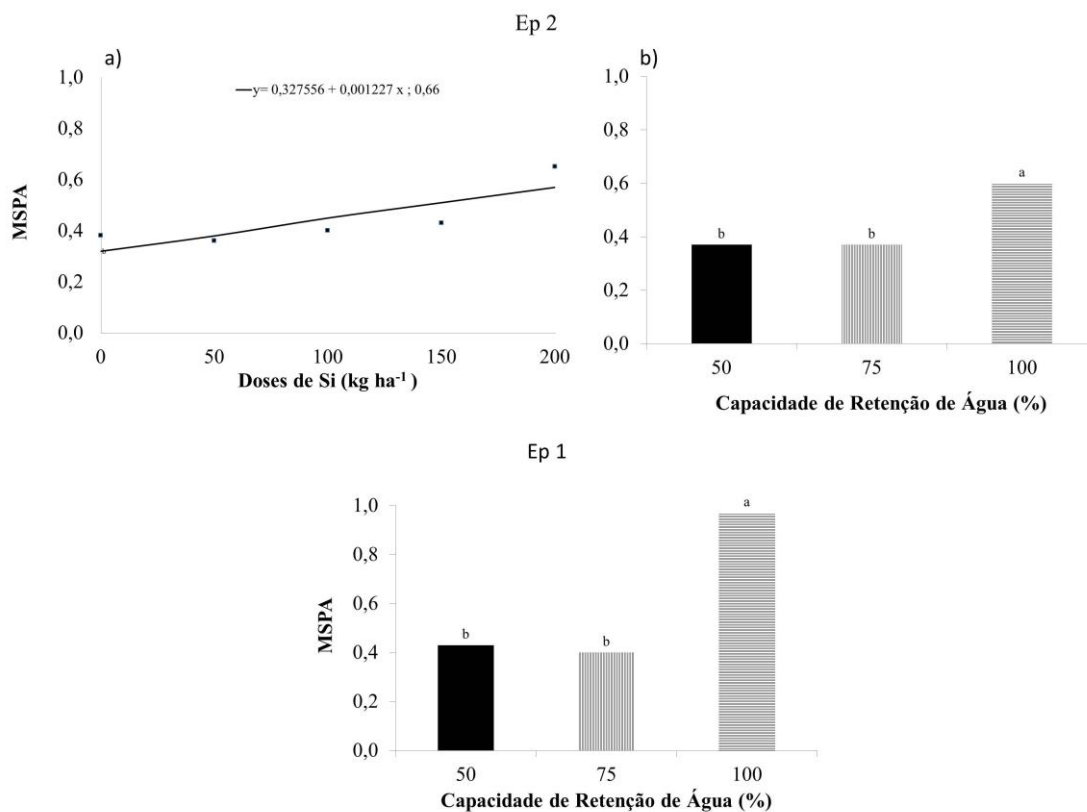


FIGURA 20. Massa seca da parte aérea (MSPA) na Época 1 (b) e na Época 2 (a - c) plantas de Chia (*Salvia hispanica L.*) em função de diferentes doses de silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019. Letras minúsculas comparam as capacidades de retenção de água (CRA) na época 2 (b) e época 1 (c), respectivamente (Tukey, $p < 0,05$).

Araújo et al. (2014) verificaram em genótipos de feijão, que a linhagem BRS Marataoã, sob restrição hídrica e ausência de Si, apresentou redução na *MSPA*. Por outro lado, foi observado aumento de 16,49%, quando submetido ao tratamento com Si. Esse resultado sugere que o Si foi benéfico ao ganho de matéria fresca. Os autores relatam que houve aumento de 13,62% e 21,93% de *MSPA* nos genótipos Costela de Vaca e BRS Rouxinol sob 100% de disponibilidade hídrica e tratados com Si, respectivamente, em relação à ausência de Si.

As massas frescas (MFR) e secas das raízes (MSR) foram influenciadas pelos fatores em estudo isoladamente apenas na época 2, sendo que os maiores valores com 200 kg ha⁻¹ de Si e 100% da CRA (Figura 21a e 21b).

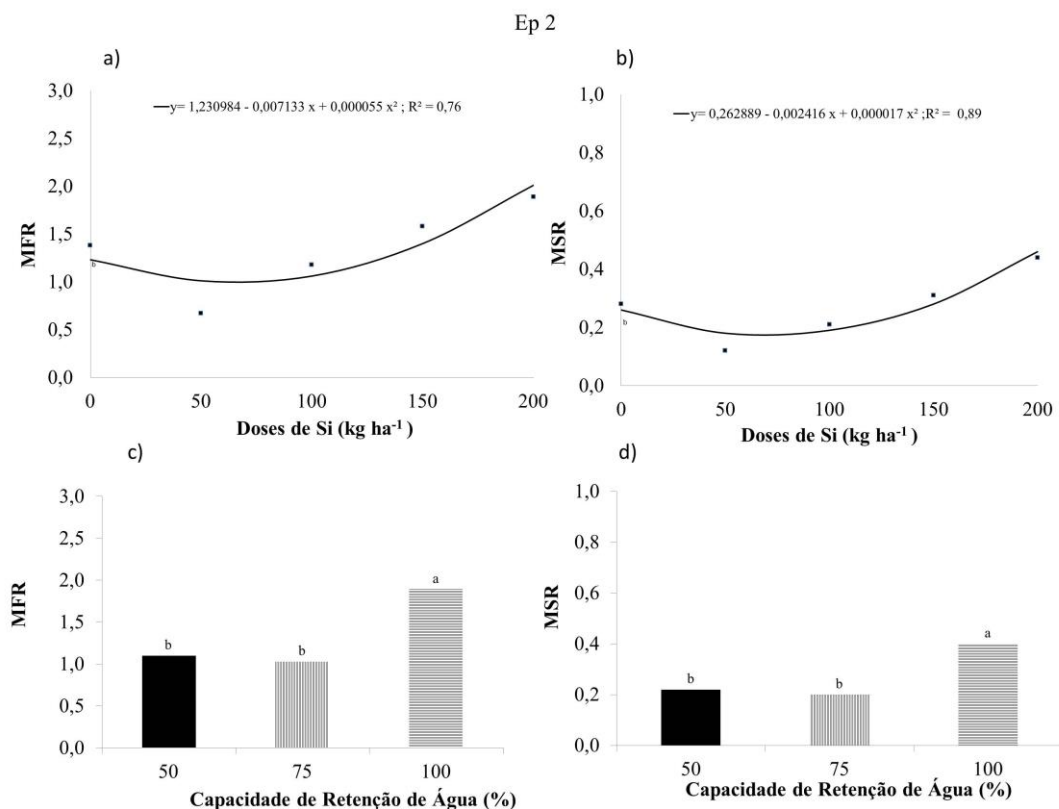


FIGURA 21. Massa fresca da raiz (MFR) na Época 1 (a - c) e na Época 2 (b - d) plantas de Chia (*Salvia hispanica* L.) em função de diferentes doses de silício e capacidades de retenção de água no solo. Dourados, UFGD, 2019. Letras minúsculas comparam as capacidades de retenção de água (CRA) na época 2 (c) e (d), respectivamente (Tukey, $p < 0,05$).

Amin et al. (2014) também verificaram que o estresse hídrico (60% CRA) em híbridos de milho, reduziu significativamente as características comprimento de raiz, massa seca de raiz e massa seca da parte aérea devido à inibição induzida pela seca no crescimento em comparação com condições de controle (100% CRA) nos dois híbridos estudados. Confirmando com outros caracteres estudados, também observa-se que doses elevadas de Si (100 e 150 kg ha^{-1}) combinadas com CRA de 100% proporcionaram maiores médias de CPA, MSR e MSPA.

Moreira et al. (2010) e Teodoro et al. (2015) comentam que o Si exerce efeito positivo no rendimento de massa seca e de grãos em soja cultivada sob déficit hídrico. Para esses pesquisadores, respostas positivas à aplicação do Si podem ser

atribuídas à maior taxa de assimilação líquida de CO₂ e, conseqüentemente, maior crescimento relativo da cultura.

Da mesma forma, Simon et al. (2017) em *S. hispânica L.* e Alves et al. (2014) em *Cucumis anguria*, verificaram decréscimos para massa fresca da parte aérea e raiz à medida que aumenta a restrição hídrica.

Portanto, o presente estudo demonstrou que o silício mitigou o déficit hídrico para as características de expansão e número de folhas em ambas épocas, e maior conteúdo relativo de água nas folhas na época 2, não havendo efeito para características do metabolismo fotossintético da cultura.

A literatura ressalta que o Si atenua o estresse hídrico em algumas culturas, entretanto para a chia, sugiro mais novos estudos relacionando o efeito do elemento no metabolismo fotossintético e no crescimento das plantas sob déficit hídrico.

CONCLUSÃO

A época 2 proporciona melhores condições para emergência de chia independente das CRA ou dose de silício.

A capacidade de retenção de água de 100% associada a dose de silício de 100 kg/ha^{-1} proporcionou maior eficiência nas trocas gasosas e crescimento de plantas.

O silício mitigou o déficit hídrico para fluorescência inicial, conteúdo relativo de água nas folhas, número de folhas e área foliar, mas não mitigou esse efeito sobre a emergência das plântulas, crescimento em altura e radicular e nem sobre a bioquímica da fotossíntese.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLA, M.M. **Sustainable effects of diatomites on the growth criteria and phytochemical contents of *Vicia faba* plants**. 4th Conference on Recent Technologies in Agriculture, November 2009, Faculty of Agriculture, Cairo University, Giza, Egypt.

ALVES, C.Z.; LOURENÇO, F.M.S.; SILVA, J.B.; SILVA, T.R.B. Efeito do estresse hídrico e salino na germinação e vigor de sementes de maxixe. *Revista Interciência*, v.39, n.5, p.333-337, 2014. . 06 Abr. 2016. **Revista Ciência Agroambiental**, v.15, n.1, 2017.

AMIN, M; AHMAD, R; BASRA, S. M. A; MURTAZA, G. Silicon induced improvement in morpho-physiological traits of maize (*Zea mays L.*) under water déficit. *Pakistan Journal of Agricultural Science*, v.51, p.187-196, 2014.

ARAÚJO, E. C.; COSTA, R. S.; LOPES, E. C.; DAHER, R. F.; FERNANDES, M. E. B. Qualidade das mudas de espécies arbóreas de mangue cultivadas em viveiros e diferentes substrates. **Acta Ambiental Catarinense**, v. 11, n. 1, p. 21-32, 2014.

ARAÚJO, E.D. MELO, A.S; ROCHA, M.S; CARNEIRO, R.F; ROCHA, M.M. Genotypic variation on the antioxidative response of cowpea cultivars exposed to osmotic stress. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 30, n. 4, p. XX – XX, out. – dez., 2017.

BAGINSKY, C; ARENAS, J; ESCOBAR, H; GARRIDO, M; VALERO, D; TELLO, D; PIZARRO, L; MORALES, L; SILVA, H. **Determinación de fecha de siembra óptima de chia en zonas de clima desértico y templado mediterráneo semiárido bajo condiciones de riego en Chile**. Parecer técnico, Chile, 2014.

BARRETO, R.F; SCHIAVON JÚNIOR, A.A; MAGGIO, M.A; PRADO, R.M.Silicon alleviates ammonium toxicity in cauliflower and in broccoli. **Scientia Horticulturae**, v.225, p.743–750, 2017.

BOCHICCHIO, R. et al. **Innovative Crop Productions for Healthy Food: The Case of Chia (*Salvia hispanica L.*)**. In.: VASTOLA, A (ed.). *The Sustainability of Agro-Food and Natural Resource Systems in the Mediterranean Basin*, p.29-45, 2015.

BOLHÀR-NORDENKAMPF, H.R.; OQUIST, G. Chlorophyll fluorescence as a toll in photosynthesis research. In: HALL, D.; SCURLOCK, J. M. O.; BOLHÀR-NORDENKAMPF, H. R.; LONG, S. P. (Eds.). **Photosynthesis and production in a changing environmental**. London: Chapman & Hall, 1993. p. 193-206.

CANTUÁRIO, F.S.; LUZ, J.M.Q.; PEREIRA A.I.A.; SALOMÃO L.C.; REBOUÇAS, T.N.H. Podridão apical e escaldadura em frutos de pimentão submetidos a estresse hídrico e doses de silício. **Horticultura Brasileira**, v.32, n.2, p.215-219, 2014.

CAMPELO DH, LACERDA CF, SOUSA JA, CORREIA D, BEZERRA AME, ARAÚJO JDM AND NEVES ALR. Trocas gasosas e eficiência do fotossistema II em

plantas adultas de seis espécies florestais em função do suprimento de água no solo. **Revista Árvore**. 39 (5): pg. 973-983, 2015.

CHAKRABORTY, K; SINGH A. L.; KALARIYA K. A.;GOSWAMI, N.;ZALA, P.V. Physiological responses of peanut (*Arachishypogaea L.*) cultivars to water deficit stress: status of oxidative stress and antioxidant enzyme activities. **Acta Botanica Croatica**, v.74, n.1, p.123-142, 2015.

DEREN, C. **Plant genotypes, silicon concentration na d silicon related responses**. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G.H. Silicon in Agriculture. Netherlands: Elsevier Science, 2001. cap. 8, p. 149-158.

FERRAZ, R.L. de S.;MAGALHÃES, I.D.;BELTRÃO, N.E. de M.; MELO, A.S.de.; NETO, J.F.de B.;ROCHA, M.doS. Photosynthetic pigments, cell extrusion and relative leaf water content of the castor be anunder silicone and salinity. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.9, p.841-8, 2015.

FERREIRA, D.F. Sisvar: A computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v.35, n.6, p.1039-1042, 2011.

FIETZ, C,R; FISCH, G,F. **O clima da região de Dourados, MS**, Editora Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados, 2006, 32 p.

GONG, H. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. **Plant Science**, v. 169, n. 13-14, p. 313-321, 2005.

GUNES, A. *et al.* Silicon- mediated changes on some physiological and enzymatic parameters symptomatic of oxidative stress in barley grown in sodic-B toxic soil. **Journal of Plant Physiology**, v. 164, n. 6, p. 807-811, 2007.

HECKMAN. Silicon: a beneficial substance. **Better Crops**,v.97,n.4,p. 14-16. 2013.

HEINEMANN, A.B. et al. Eficiência de uso da radiação solar na produtividade do trigo decorrente da adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.2, p.352-356, 2006

JAMBOONSRI, W. et al. Extending the range of an ancient crop, *Salvia hispanica L.*-a new ω 3 source. **Genetic Resources and Crop Evolution**, Dordrecht, v.59, n.2, p.171-178, 2012.

KORNDORFER, G. H.; DATNOFF, L. E. **Papel do silício na produção de cana de açúcar**. In: SECAP 200, SEMINÁRIO DE CANA DE AÇÚCAR DE PIRACICABA, 5, Piracicaba. jul. 2000.

LABOURIAL, L. G.; VALADARES, M. B. **On the germination of seeds of Calotropis procera**. Anais da Academia Brasileira de Ciências, São Paulo, n.48, p. 174-186, 1976.

LISAR, S. Y. S.; MOTAFAKKERAZAD, R.; HOSSAIN, M.M.; ISMAIL, M. M. **Water Stress in Plants: Causes, Effects and Responses**. Water Stress, Chapter: 1, Publisher: In Tech: Rijeka, Croatia, Editors: Ismail M. M. Rahman, Hiroshi Hasegawa, pp.1–14.

MAGUIRE, J. D. Speed of germination-aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. **Crop Science**, Madison, v. 2, n. 1, jan./feb. 1962. 176-177p.

MENEGALE, M.L.C; CASTRO, G.S; MANCUSO, M.A. Silício: interação com o sistema solo-planta. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, v.4, n. especial, p.435-454, 2015.

MIGLIAVACCA, R.A. et al. O cultivo da chia no Brasil: futuro e perspectivas. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, v.3, n. especial, p.161-179, 2014.

MING, D. F. Effects of silicon on the physiological and biochemical characteristics of roots of rice seedlings under water stress. **China Agriculture Science**, v. 45, n. 12, p. 2510-2519, 2012.

MITANI, N.; MA, J. F. Uptake system of silicon in different plant species. **Journal of Experimental Botany**, London, v. 56, p. 1255-1261, 2005.

MIYAKE, Y.; TAKAHASHI. Effect of silicon on the growth of soybean plants in solution culture. **Soil Science and Plant Nutrition**, v.31, p.625-636,1985.

MOREIRA, A. R.; FAGAN, E. B.; MARTINS, K. V.; SOUZA, C. H. E. Resposta da cultura da soja a adubação de silício foliar. **Bioscience Journal**, v. 26, n. 3, p. 413-423, 2010.

OLIVEIRA L. A.; CASTRO N. M. Ocorrência de sílica nas folhas de *Curatella americana* L. e de *Davilla elliptica* St. Hill. **Revista Horizonte Científica**. Uberlândia, v. 4, p. 116, Fev. 2002.

PAIVA, E.P; TORRES, S.B; MORAIS, J.R; SÁ, F.V; LEITE, M.S; Germination of chia seeds in diferente substrates and water volumes. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 32, n. 1, p. 270-275, jan. mar., 2019.

PARVEEN. N; ASHRAF, M. Role of silicon in mitigating the adverse effects of salt stress on growth and photosynthetic attributes of two maize (*Zea mays* L.) cultivars grown hydroponically. **Pakistan Journal Botanic**. 42: 1675-1684, 2010.

PEI, Z.F; MING, D.F; LIU, D; WAN, G.L; GENG, X.X; GONG, H.J; ZHOU, W.J. Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. **Journal of Plant Growth Regulation**, v.29, p.106-115, 2010.

PEREIRA, H. S.; KORNDÖRFER, G. H.; VIDAL, A. A.; CAMARGO, M. S. Fontes de silício para a cultura do arroz [Silicon sources for rice]. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 61, p. 35-42, 2004.

PEREIRA, M. D; LOPES, J.C. Germinação e desenvolvimento de plântulas de pinhão manso sob condições de estresse hídrico simulado. **Semina: Ciências Agrárias** 32(1):1837-1842, 2011.

PEREIRA, W. P.; MELO FILHO, P. A.; ALBUQUERQUE, M. B.; NOGUEIRA, R. J. C.; SANTOS, R. C. Mudanças bioquímicas em genótipos de amendoim submetidos a déficit hídrico moderado. **Revista ciência agrônômica**, v. 43, n. 4, p. 766-773, 2012.

ROSA, D. B. C. J. **Estresse hídrico no crescimento e trocas gasosas em Muda de Copaifera langsdorffii Desf.** Tese apresentada a Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Agronomia, 2017.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistemas brasileiros de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: EMBRAPA Solos, 2013. 353p.

SCALON, S. P. Q.; MUSSURY, R. M.; EUZÉBIO, V. L. M.; KODAMA, F. M.; KISSMAN, C. Estress hídrico no metabolismo e crescimento inicial de mudas de mutamo (*Guazuma ulmifolia Lam.*). **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 4, p. 655-662, 2011.

SCHANSKER, G.; TÓTH, S. Z.; KOVÁCS, L.; HOLZWARATH, A. R.; GARAB, G. Evidence for a fluorescence yield change driven by a light-induced conformational change within photosystem II during the fast chlorophyll a fluorescence rise. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics**, Germany, v. 1807, n. 9, p. 1032-1043, 2011.

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

SILVA, J. B. C.; NAKAGAWA, J. 1995. Estudos de fórmulas para cálculo de germinação. Informativo ABRATES, Londrina, v. 5, n. 1, p. 62-73.

SIMON, C.A; SORANA, C.K.P.M; ALVES, C.Z. Estresse hídrico na germinação e vigor de sementes de chia. *Rev. Ciênc. Agroamb.* v.15, n.1, 2017.

STEFANELLO, R; ABBAD, M.A.B; NEVES, L.A.S; VIANA, B.B. Resposta fisiológica de sementes de chia (*Salvia hispânica L. – Lamiales: Lamiaceae*) ao estresse salino. **Biotemas** 28(4):35-39, 2015.

STEFANELLO, R. VIANA, B.B. NEVES, L.A.S. Resposta fisiológica de sementes de chia e linhaça ao estresse hídrico. **Iheringia**, Série Botânica, Porto Alegre, 72(2):161-163, 31 de agosto de 2017

SOUZA, L. C. D.; MOTA SIQUEIRA, J. A.; SOUSA SILVA, J. L.; SILVA, J. N. D.; RESUENO COELHO, C. C.; NEVES, M. G.; LOBATO, A. K. D. S. Compostos

nitrogenados, proteínas e aminoácidos em milho sob diferentes níveis de silício e deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.13,n.2,p. 117-128, 2014

TAIZ, L; ZEIGER, E; MULLER, I.M; MURPHY, A. **Fotossíntese: Reações Luminosas**. In: Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal, 6ed., tradução: Alexandra Antunes Mastroberti et al., p.171 – 202. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TEIXEIRA, G.C.M. **Silício na mitigação do déficit hídrico de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar na fase inicial de crescimento**. Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias –Unesp, Câmpus de Jaboticabal, 2018.

TEODORO, P.E; RIBEIRO, L.P; OLIVEIRA,E.P; CORRÊA, C.C.G; TORRES, F.E. Acúmulo de massa seca na soja em resposta a aplicação foliar com silício sob condições de déficit hídrico. **Bioscience Journal**, v. 31, n. 1, p. 161-170, 2015.

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. 2, p. 527-533, 2004.

CAPITULO II - SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DO DÉFICIT HÍDRICO E POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO DE CHIA

Autor: Wesley Souza Prado

Orientadora: Dr^a: Silvana de Paula Quintão Scalon

RESUMO

Pouco se sabe acerca dos mecanismos relacionados à fisiologia e metabolismo da Chia (*Salvia hispanica*) frente às condições de déficit hídrico. Diante disso, o objetivo desse estudo foi avaliar o efeito de doses de silício associado ao déficit hídrico intermitente sobre o metabolismo fotossintético e crescimento das plantas de chia. O experimento foi desenvolvido em viveiro, durante o período de abril a julho de 2019. As unidades experimentais foram constituídas por vasos de quatro kg, contendo 2 plantas. Os tratamentos foram constituídos por quatro doses de silício (0, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹), duas condições de irrigação (contínua e intermitente) e a três períodos de avaliação (Início – T0, 50 dias após a semeadura, quando as folhas das plantas estavam com tamanho adequado para a avaliação no aparelho fotossintético (IRGA), Fotossíntese próximo de Zero- FS0, ocorrendo aos 57 dias após a semeadura, quando um dos tratamentos atingiu esse nível e Final – F, ocorreu ao fim do experimento, aos 91 dias após a semeadura, próximo da senescência), onde todos alocados em delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial com quatro repetições. Verifica-se efeito benéfico do Si nas plantas na FS0 para taxa fotossintética (A). As menores concentração interna de CO₂ (Ci) foram observadas na dose de 140,13 kg ha⁻¹ sob déficit hídrico intermitente. As plantas cultivadas sob irrigação contínua apresentaram maior crescimento de plantas de chia. A dose de Si de 100 kg/há atenua o déficit hídrico, favorecendo a manutenção e a recuperação do metabolismo fotossintético em plantas de chia.

Palavras chave: *Salvia hispânica L.*, ácido silícico, metabolismo fotossintético, estresse hídrico

CHAPTER II - SILICON IN THE MITIGATION OF THE WATER DEFICIT AND POTENTIAL FOR CHIA RECOVERY

Author: Wesley Souza Prado

Adviser: Dr^a: Silvana de Paula Quintão Scalon

Little is known about the mechanisms related to the physiology and metabolism of Chia (*Hispanic salvia*) in the face of water deficit conditions. Therefore, the objective of this study was to evaluate the effect of silicon doses associated with intermittent water deficit on photosynthetic metabolism and growth of chia plants. The experiment was carried out in a nursery, from April to July 2019. The experimental units consisted of four kg pots, containing 2 plants. The treatments consisted of four doses of silicon (0, 100, 150 and 200 kg ha⁻¹), two irrigation conditions (continuous and intermittent) and three evaluation periods (Start - T0, 50 days after sowing, when the leaves of the plants were adequately sized for evaluation in the photosynthetic apparatus (IRGA), Photosynthesis close to Zero-FS0, occurring at 57 days after sowing, when one of the treatments reached this level and Final - F, occurred at the end of the experiment, at 91 days after sowing, close to senescence), where all were allocated in a completely randomized design in a factorial scheme with four replications. There is a beneficial effect of Si on plants in FS0 for photosynthetic rate (A). The lowest internal CO₂ concentration (Ci) was observed at a dose of 140.13 kg ha⁻¹ under intermittent water deficit. Plants grown under continuous irrigation showed higher growth of chia plants. The 100 kg ha⁻¹ Si dose attenuates the water deficit, favoring the maintenance and recovery of photosynthetic metabolism in chia plants.

Keywords: *Salvia hispanica L.*, silicic acid, photosynthetic metabolism, water stress

INTRODUÇÃO

A chia (*Salvia hispanica* L.), também chamada de artemisa espanhola, salvia espanhola, chia mexicana e chia negra, é originária da região que se estende do centro-oeste do México até o norte da Guatemala (CAHILL, 2004). Pode ser usada com várias finalidades, dentre elas, suas folhas, devido a presença de óleos essenciais, podem ser usadas como repelente de insetos e seus grãos podem ser consumidos in natura ou processados na forma de óleo (JAMBOONSRI et al., 2012). Segundo Coelho e Salas-Mellado (2014) e Ferreira (2013), os grãos de chia podem ser considerados uma excelente fonte nutricional, uma vez que apresentam elevado teor de proteínas (19-23%), fibras alimentares (34,6%), cálcio (0,456%) e ácidos graxos (23%).

Entretanto, pouco se sabe acerca dos mecanismos relacionados à sua fisiologia e metabolismo frente às condições de estresse impostas pelo ambiente, especialmente aquelas relacionadas ao déficit hídrico, situação que limita o crescimento e desenvolvimento das espécies, além de regular a sua distribuição espacial (SANTANA et al., 2016).

Fisiologicamente, os vegetais em condições de estresse apresentam uma série de respostas distintas, que vão desde as alterações nas relações das trocas gasosas, como por exemplo as mudanças na taxa de assimilação líquida de CO₂, que conseqüentemente afetam a fotossíntese, até mesmo de mudanças nas variáveis relacionadas à fluorescência da clorofila *a* e o decréscimo na atividade de enzimas do Ciclo de Calvin e outras enzimas relacionadas ao combate dos danos oriundos do estresse oxidativo, tais como a superóxido dismutase, a peroxidase e a catalase (CAMPELO et al., 2015).

Nas plantas, o estresse causado pelo déficit de água afeta o potencial hídrico das folhas e pode alterar a atividade das suas trocas gasosas, uma vez que o conteúdo total de água das células e dos tecidos vegetais está abaixo da máxima hidratação (TAIZ et al., 2017). Algumas respostas ao déficit hídrico são comumente observadas, tais como o fechamento estomático e a conseqüente diminuição da fotossíntese e da transpiração, além de danos às membranas dos tecidos, a perda de pigmentos relacionados à fotossíntese e o comprometimento dos processos de fixação e assimilação do gás carbônico, e na ação de enzimas que combatem o estresse oxidativo (FLEXAS et al., 2012; ASHARAF e HARRIS, 2013; CAMPELO et al., 2015).

A extensão dos efeitos que o déficit hídrico pode causar nas plantas depende da sua intensidade e duração e da capacidade genética que as espécies possuem para responder a este tipo de estresse. Pesquisas indicam que as plantas possuem de modo geral, rápida e até completa recuperação de sua taxa fotossintética quando submetidas ao déficit hídrico leve ou moderado, entretanto, diante de déficit hídrico severo o quadro é alterado e tal recuperação é lenta ou até mesmo nula (ROSA, 2017).

O silício vem sendo estudado em algumas culturas como um elemento que desempenha um papel importante na tolerância a estresses ambientais. O efeito do elemento na tolerância das plantas superiores ao déficit hídrico poderia estar associada ao aumento da ação das defesas antioxidantes, uma redução do dano oxidativo às moléculas funcionais e membranas, e manutenção de sistemas fisiológicos, bem como dos processos fotossintéticos sob condições de déficit hídrico (GONG et al., 2005; GUNES et al., 2007; ZHU et al., 2004).

O elemento torna as células epidérmicas das folhas mais eretas, o que induz maior absorção de CO₂, em decorrência disso, há um aumento na eficiência fotossintética e no teor de clorofila. Provavelmente isto ocorre pelo acúmulo de Si na superfície foliar, servindo como barreira física e tendo um importante papel na regulação osmótica, diminuindo assim o estresse causado pelo déficit hídrico. (CANTUÁRIO et al., 2014).

Assim, hipotetizamos que o silício atenua o déficit hídrico em chia favorecendo a manutenção ou recuperação do metabolismo fotossintético e conseqüentemente do crescimento das plantas. Portanto, o objetivo do presente estudo foi avaliar o efeito de doses de silício associado ao déficit hídrico intermitente sobre o metabolismo fotossintético e crescimento das plantas de chia .

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em viveiro com tela de sombreamento de 30% e proteção adicional de cobertura plástica de 150 micras na Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), situada a latitude de 22°11'43"S, longitude de 54°56'08"W e altitude de 458 m. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é Mesotérmico Úmido do tipo Cwa, com temperaturas e precipitações médias anuais variando de 20 a 24°C e de 1250 mm a 1500 mm.

Para avaliar o efeito de doses de silício associado ao déficit hídrico intermitente nas respostas de crescimento e metabolismo fotossintético foram semeadas 10 sementes em vasos de 4 kg a uma profundidade de cinco centímetros, utilizando como substrato Latossolo Vermelho Distroférrico (peneirado), as plantas após o estabelecimento foram desbastadas para 2 unidades por vaso. A fonte de silício utilizada foi o ácido silícico precipitado puríssimo da Merck ($\text{SiO}_2 \times \text{H}_2\text{O}$), aplicado via solo dois dias antes da semeadura.

As plantas foram irrigadas na capacidade de retenção de água de 70% até o início do período de avaliação T0 e mantidas em sombrite 30%. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4x2x3, onde os tratamentos foram quatro doses de silício (0, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹), duas condições de irrigação (contínua e intermitente) e três períodos de avaliação (Início – T0, Fotossíntese próximo de Zero- FS0 e Final – F) com quatro repetições. A semeadura ocorreu no dia 27 de abril de 2019.

As avaliações foram realizadas no começo do período de avaliação T0 (Início - 50 dias após semeadura), quando as folhas das plantas estavam com tamanho adequado para a avaliação no aparelho fotossintético (IRGA), ocorrido próximo da floração. A avaliação FS0 (1ª Fotossíntese próximo de Zero) ocorreu 57 dias após a semeadura, quando um dos tratamentos atingiu esse nível de fotossíntese, e posteriormente reirrigadas. E a última avaliação ocorreu ao fim do experimento (Final), 91 dias após a semeadura, próximo da senescência.

As plantas foram avaliadas de acordo com as seguintes características:

-Fluorescência da clorofila *a*: obtida por meio de fluorômetro portátil modelo OS-30p (Opti-Sciences Chlorophyll Fluorometer, Hudson, USA), sendo

registradas as medidas de fluorescência inicial (F_0), e a eficiência quântica potencial do fotossistema II (F_v/F_m). A determinação da fluorescência foi realizada entre 8 e 11h da manhã, sendo as folhas 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.

-Índice de clorofila (SPAD - *Soil Plant Analysis Development*), determinado utilizando um medidor portátil de clorofila, Konica Minolta, modelo SPAD-502, senso as leituras realizadas nos limbos medianos de cada folha.

-Trocas gasosas: taxa fotossintética ($A \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), condutância estomática ($G_s \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e concentração interna de CO_2 ($C_i \mu\text{mol mol}^{-1}$) foram quantificadas utilizando-se analisador de gases no infravermelho (IRGA), marca ADC, modelo LCI PRO (Analytical Development Co. Ltda, Hoddesdon, UK). As avaliações foram realizadas em duas folhas completamente expandida e previamente marcada de três mudas, de modo que todas as medições foram realizadas nas mesmas plantas de cada tratamento (N=6), no período da manhã, entre 8 e 11 horas. A partir dos dados de trocas gasosas foram calculadas as: eficiências intrínseca do uso da água ($E_iUA \mu\text{molCO}_2/ \mu\text{mol mol}^{-1}$) e carboxilação da Rubisco ($A/C_i \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}/ \mu\text{mol mol}^{-1}$) (ZHANG et al., 2001).

-Comprimento da parte aérea (CPA) e raiz (CR), obtida por meio de régua graduada e expressa em centímetros (cm). Diâmetro de colmo, obtido por meio de paquímetro digital e expressa em milímetros (mm). Contabilizaram-se o Número de folhas (NF), contando-se o número total de folhas completamente expandidas por planta. Área foliar (AF), realizada com o aparelho LI-COR modelo LI-3100C, sendo os resultados expressos em cm^2 .

-Massa frescas e secas: as plantas foram coletadas e separadas em parte aérea (MFPA) e raiz (MFR) a partir da pesagem de cada órgão fresco em balança analítica de precisão (0,0001g). Em seguida os materiais foram acondicionadas para secagem em estufa de circulação forçada de ar, regulada à 70°C por 72 horas ou até atingir massa constante, posteriormente pesadas em balança analítica de precisão (0,0001g) para determinação da massa seca de parte aérea (MSPA) e raiz (MSR).

Os dados coletados foram analisados estatisticamente, por meio da análise de variância e ao teste F a 5% de probabilidade e havendo efeito significativo as

médias dos tratamentos das condições de irrigação e períodos de avaliação foram comparadas pelo teste de Tukey e as médias das doses de silício e as interações entre os fatores foram ajustadas por meio da análise de regressão, até o nível de 5% de probabilidade. Os dados foram analisados com o auxílio do programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A taxa fotossintética (A) foi influenciada pela interação doses de silício e regimes hídricos, sendo observada máxima A com $109,82 \text{ kg ha}^{-1}$. Ressalta-se que mesmo as plantas sob déficit hídrico intermitente apresentaram valores foram próximos ao das plantas sob irrigação contínua (Figura 1a).

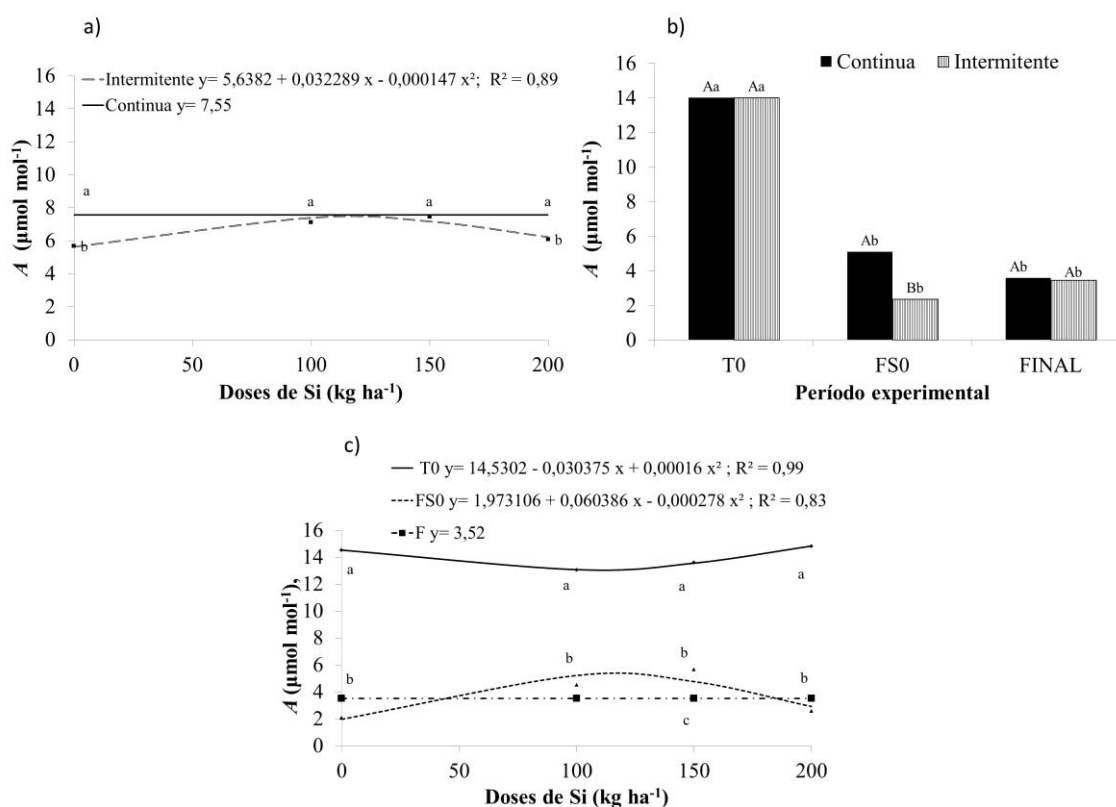


FIGURA 1. Taxa Fotossintética (A) (a, b - c) de plantas de Chia (*Salvia hispânica L.*) em função de diferentes níveis de Silício associado ao déficit hídrico intermitente e períodos de avaliação. Dourados, UFGD, 2019. Letras minúsculas comparam as condições de irrigação e períodos de avaliação dentro de cada dose de silício (a) e (c), respectivamente (t de Bonferroni e Tukey, $p < 0,05$). Letras maiúsculas comparam as condições de irrigação dentro de cada período de avaliação (t de Bonferroni, $p < 0,05$) e letras minúsculas comparam os períodos de avaliação dentro de cada condição de irrigação (Tukey, $p < 0,05$) (b).

Quanto a interação períodos de avaliação e condições de irrigação as plantas sob déficit hídrico apresentaram redução nos valores de A . Embora as plantas estivessem em condição de estresse, verificou-se que ao realizar a retomada da irrigação ocorreu incremento na A semelhante ao controle ao final do período experimental, indicando que houve recuperação das plantas. Destaca-se que mesmo havendo recuperação da capacidade fotossintética, os valores em ambos regimes hídricos foram inferiores aos observados no T0 na avaliação final as plantas já encontravam-se em senescência (Figura 1b).

Além disso, verificou-se efeito benéfico do silício nas plantas na FS0, sendo que a dose de Si de $108,60 \text{ kg ha}^{-1}$ proporcionou máxima A foi de $5,25 \mu\text{mol mol}^{-1}$. Ressalta-se que esse valor foi superior aos daquelas sem aplicação de Si, que apresentaram $1,97 \mu\text{mol mol}^{-1}$ (Figura 1c).

A concentração interna de CO_2 (C_i) foi influenciada pelas interações entre silício e períodos de avaliação e entre o silício e regimes hídricos, sendo que os maiores valores de C_i ocorrem nas plantas cultivadas sem o Si. As menores C_i foram observadas nas doses de $140,13$ e 200 kg ha^{-1} de Si sob déficit hídrico intermitente e na FS0, respectivamente. Essa redução dos valores de C_i são desejáveis, pois indicam maior eficiência de assimilação de CO_2 (A) por apresentar maior carboxilação da rubisco nessas condições hídricas, e períodos e doses de Si (Figura 2a, b).

Essa redução da concentração intercelular de CO_2 nas plantas tratadas com silício pode ser atribuída à camada protetora conferida pelo silício ao se ligar às camadas de parede celular, o que pode reduzir a entrada de CO_2 , mas ao mesmo tempo reduz a saída de água por transpiração, mantendo o equilíbrio celular e a atividade metabólica de carboxilação (PEI et al., 2010). O estresse hídrico leva ao fechamento estomático, causado por desidratação das células guarda ou por resposta hormonal, podendo representar uma vantagem para as plantas, pois previne imediatamente a desidratação dos tecidos vegetais (EGEA et al., 2011), embora cause redução na disponibilidade de CO_2 para a carboxilação.

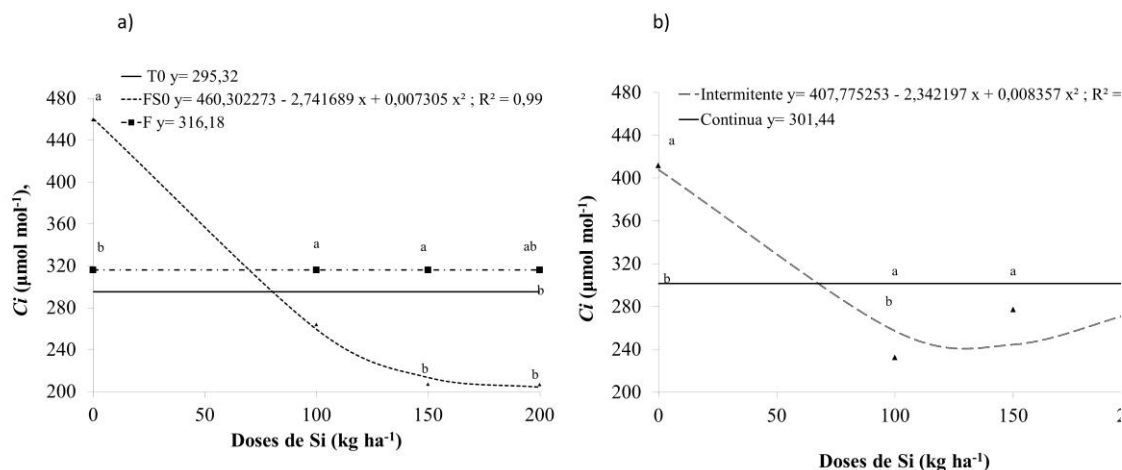


FIGURA 2. Concentração interna de CO₂ (C_i) (a - b) de plantas de Chia (*Salvia hispânica L.*) em função de diferentes doses de silício associado ao déficit hídrico intermitente. Dourados, UFGD, 2019. Letras minúsculas comparam os períodos de avaliação dentro de cada dose de silício (a) (Tukey, p<0,05). Letras minúsculas comparam as condições de irrigação dentro de cada dose de silício (b) (t de Bonferroni, p<0,05).

A eficiência de carboxilação da Rubisco (A/C_i) não variou significativamente entre as plantas com irrigação contínua e doses de Si, apresentando média de $0,028 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} / \mu\text{mol mol}^{-1}$. Nas plantas com irrigação intermitente observamos máxima A/C_i na dose de $79,50 \text{ (kg/há)}$ ($0,033 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} / \mu\text{mol mol}^{-1}$) (Figura 3a). No início e final do período experimental (T0 e FINAL) não houve diferenças estatísticas entre contínua e intermitente, semelhante ao observado para a A. Entretanto, no período FS0 a maior A/C_i foi nas plantas sob cultivo contínuo (Figura 3b).

No T0 não foi observada diferença entre as doses de Si avaliadas, porém as plantas apresentaram a maior valor de A/C_i ($0,048 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} / \mu\text{mol mol}^{-1}$). Em relação aos demais períodos experimentais a A/C_i foi influenciada pelas doses de silício no período de FS0, sendo a máxima observada na dose de $152,50 \text{ kg há}^{-1}$ ($0,029 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} / \mu\text{mol mol}^{-1}$). No período FINAL não houve ajuste para a relação. Nossos resultados sugerem que a eficiência da rubisco nas plantas sob déficit hídrico foi aumentando de acordo com aumento das doses de Si até certo ponto, posterior a isso, a elevação da dose de silício não contribuiu para elevar a eficiência da enzima (Figura 3c).

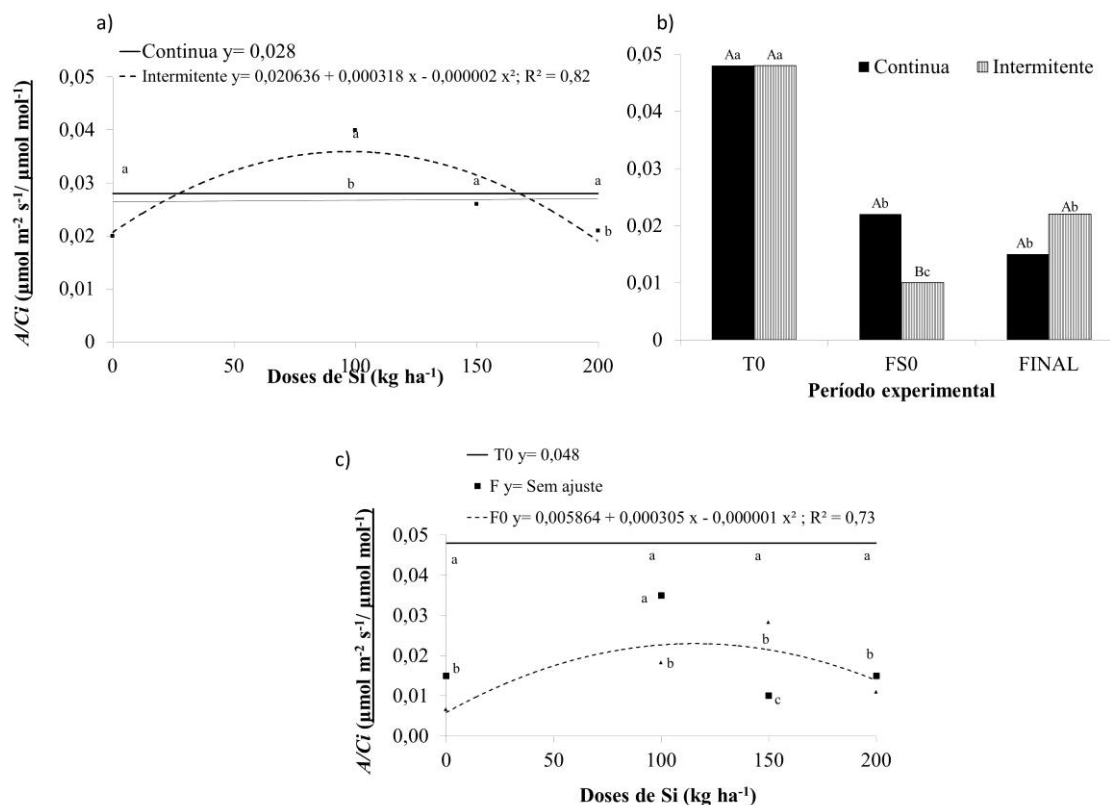


FIGURA 3. Eficiência de carboxilação da Rubisco (A/C_i) (a, b - c) de plantas de Chia (*Salvia hispanica L.*) em função de diferentes doses de silício associado ao déficit hídrico intermitente. Dourados, UFGD, 2019. Letras minúsculas comparam as condições de irrigação e períodos de avaliação dentro de cada dose de silício (a) e (c), respectivamente (t de Bonferroni e Tukey, $p < 0,05$). Letras maiúsculas comparam as condições de irrigação dentro de cada período de avaliação (t de Bonferroni, $p < 0,05$) e letras minúsculas comparam os períodos de avaliação dentro de cada condição de irrigação (Tukey, $p < 0,05$) (b).

Ressaltamos que embora a A/C_i tenha aumentado com a retomada da irrigação após o FS0, a eficiência se manteve em valores semelhantes ao das plantas com irrigação contínua na FS0, reforçando a idéia de que as plantas encontravam-se em estágio de desenvolvimento que não demandava grande atividade carboxilativa.

O aumento nos valores da fotossíntese, relacionado a redução da concentração interna de CO_2 e aumento da eficiência na carboxilação da Rubisco associadas a não irrigação e fotossínteses próximos de zero, pode estar relacionado a certa concentração de silício nas folhas, indicando que em déficit hídrico a atividade

desta enzima continuou sendo eficiente, melhorando a carboxilação, conseqüentemente a produção de fotoassimilados. Para Heckman (2013), esse elemento torna as células epidérmicas das folhas mais eretas, o que induz maior absorção de CO₂, em decorrência disso, há um aumento na eficiência fotossintética e no teor de clorofila. Provavelmente isto ocorre pelo acúmulo de Si na superfície foliar, servindo como barreira física e tendo um importante papel na regulação osmótica, diminuindo assim o estresse causado pelo déficit hídrico (CANTUÁRIO et al., 2014).

Esta situação dos valores da eficiência da Rubisco quando relacionadas com os danos do aparato fotossintético, contraria com a teoria de que valores muito baixos desta relação representam danos ao aparato fotossintético (FLEXAS et al., 2006; XU et al., 2009). Entretanto, quando conjugada esta informação com a eficiência quântica potencial do fotossistema II (F_V/F_M) das plantas sujeitas a este mesmo tratamento (não irrigadas e em F0), fica claro que não houve um dano fotoinibitório expressivo aos centros de reação do fotossistema II na Fotossíntese Zero, pois não houve diferenças estatísticas para a relação F_V/F_M entre os tratamentos estudados, com média de 0,61. Quando os centros de reação do fotossistema II estão intactos, os valores de referência para a F_V/F_M variam de 0,75 a 0,80 (BAKER e ROSENQVST, 2004). Assim, o silício, mesmo em estresse hídrico, protege o aparato fotossintético, conseqüentemente, a eficiência da enzima carboxilativa.

A eficiência intrínseca do uso de água ($EiUA$) variou com relação as doses de Si em ambas irrigações (contínua e intermitente). As plantas com irrigação contínua apresentaram maior relação na dose de Si de 200 kg ha⁻¹ (86,45 (μmol m⁻² s⁻¹), e sob irrigação intermitente a máxima eficiência na dose de Si de 101,41 kg ha⁻¹ (66,21 μmol m⁻² s⁻¹) (Figura 4a).

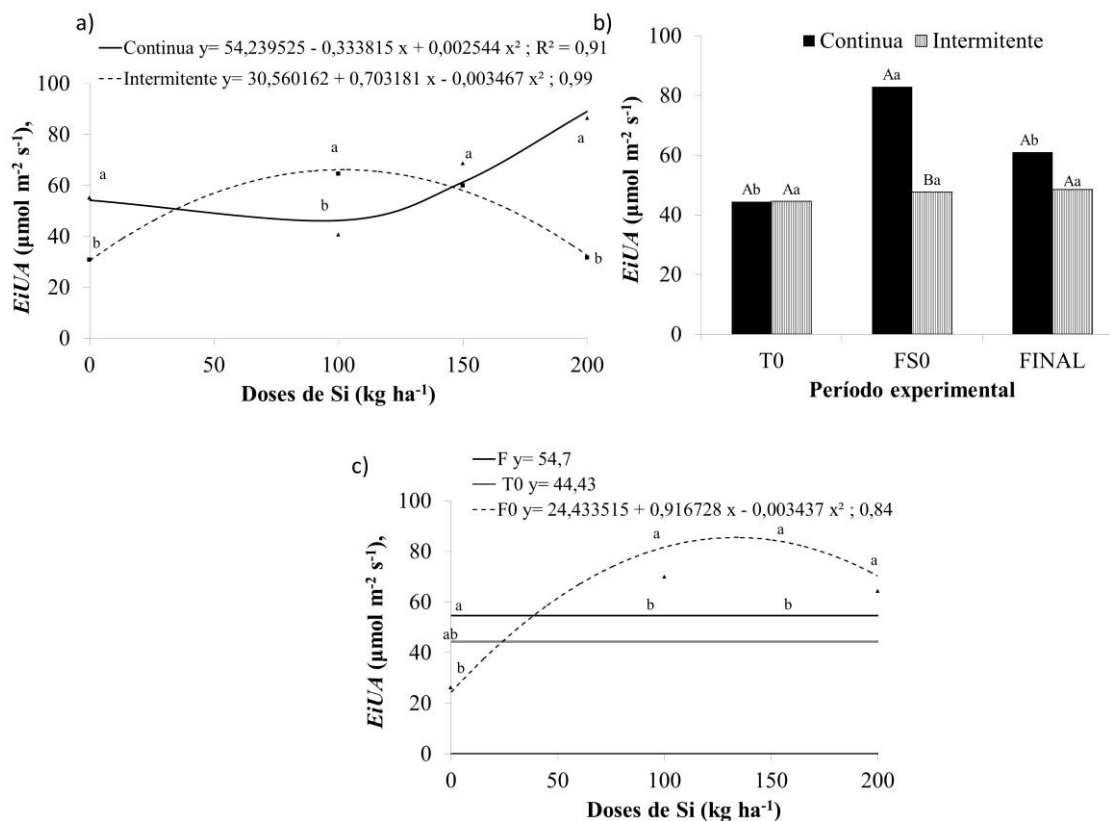


FIGURA 4. Eficiência intrínseca do uso da água (*EiUA*) (a, b - c) de plantas de Chia (*Salvia hispanica* L.) em função de diferentes doses de silício associado ao déficit hídrico intermitente. Dourados, UFGD, 2019. Letras minúsculas comparam as condições de irrigação e períodos de avaliação dentro de cada dose de silício (a) e (c), respectivamente (t de Bonferroni e Tukey, $p < 0,05$). Letras maiúsculas comparam as condições de irrigação dentro de cada período de avaliação (t de Bonferroni, $p < 0,05$) e letras minúsculas comparam os períodos de avaliação dentro de cada condição de irrigação (Tukey, $p < 0,05$) (b).

No início e no final do período experimental (T0 e FINAL) não houve diferenças significativas entre as condições de irrigação. Entretanto no FS0, a maior relação *EiUA* foi nas plantas sob irrigação contínua. Mais uma vez, ressaltamos que as plantas não elevaram a capacidade fotossintética com a retomada da irrigação, uma vez que as plantas não apresentaram diferença significativa na *EiUA* ao final do experimento em relação aos outros períodos.

A *EiUA* não variou em função das doses de silício nos períodos T0 e FINAL apresentando médias de 44,43 e 54,7 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente. O período FS0 apresentou a máxima *EiUA* na dose de Si de 133,36 kg ha^{-1} (85,56 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

(Figura 4c). A *EiUA* foi aumentando até essa dose de Si, o que denota que irrigação intermitente, ou seja, a planta passando por um estresse, o nutriente tem uma associação com a taxa fotossintética. Essa resposta fica ainda mais evidente quando comparados os resultados da taxa fotossintética quando avaliadas em F_0 , onde houve um aumento da A até em torno de 110 kg ha^{-1} de Si.

A fluorescência F_0 foi maior no FINAL das avaliações em todas as doses de silício avaliadas, e não variou entre as doses nos períodos T0 e FS0 em nenhuma das doses estudadas. Apenas a avaliação FINAL obteve diferenças entre as doses, sendo observada valor mínimo na dose de $133,36 \text{ kg ha}^{-1}$ de Si (Figura 5a e b).

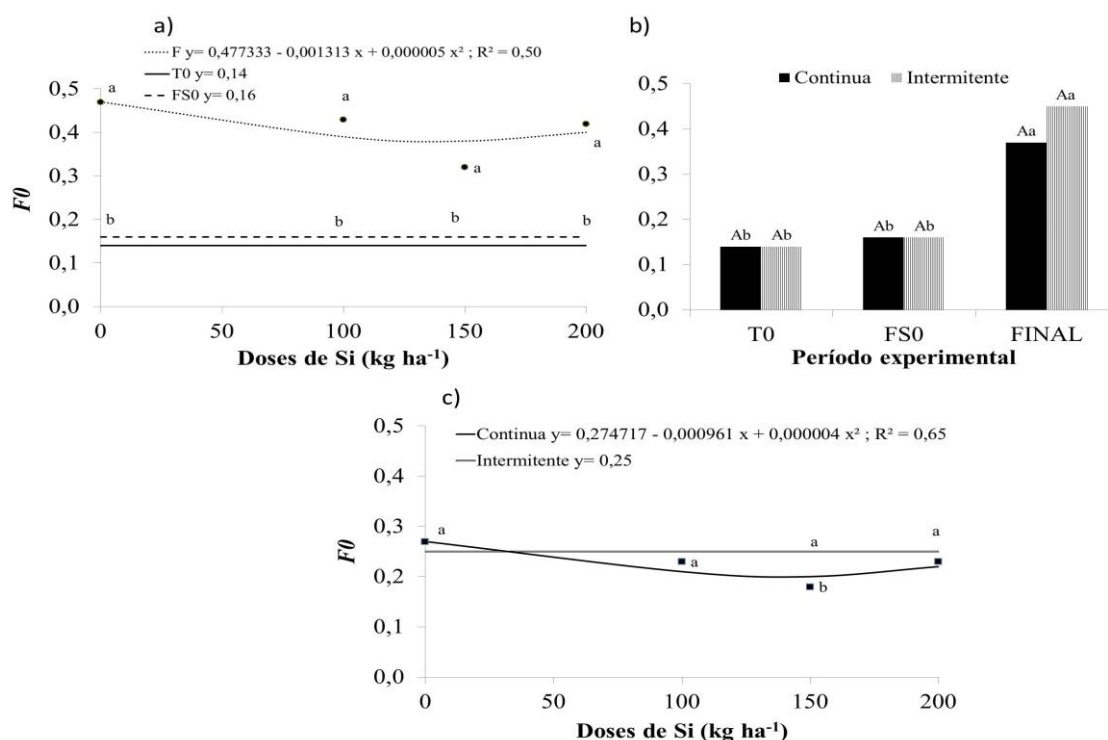


FIGURA 5. Fluorescência inicial (F_0) (a, b - c) de plantas de Chia (*Salvia hispânica L.*) em função de diferentes doses de silício associado ao déficit hídrico intermitente. Dourados, UFGD, 2019. Letras minúsculas comparam os períodos de avaliação e condições de irrigação dentro de cada dose de silício (a) e (c), respectivamente (t de Bonferroni e Tukey, $p < 0,05$). Letras maiúsculas comparam as condições de irrigação dentro de cada período de avaliação (t de Bonferroni, $p < 0,05$) e letras minúsculas comparam os períodos de avaliação dentro de cada condição de irrigação (Tukey, $p < 0,05$) (b).

As plantas intermitentes apresentaram diferenças significativas com relação as plantas com irrigação contínua apenas na dose de 150 kg ha^{-1} , com maior FS0 para intermitente (Figura 5c). O aumento da fluorescência $F0$ indica condição estressante, assim, é interessante ressaltar que embora as plantas não tenham manifestado sinal de estresse no aparato fotoquímico durante a FS0, esse sinal se manifestou no período FINAL, o que pode estar relacionado não a uma resposta aos tratamentos hídricos, mas ao estágio de desenvolvimento, conforme já sinalizado nas características da fase bioquímica da fotossíntese (A e A/Ci).

Com relação a análise das características de crescimento das plantas, verifica-se que houve interação dupla entre doses de Si x irrigação, irrigação x período experimental e doses de Si x período experimental para índice de clorofila (SPAD), comprimento da parte aérea (CPA) e raiz (CR), massa fresca de raiz (MFR), massa seca da parte aérea (MSPA) e raiz (MSR), e quanto as demais características houve diferenças significativas para fatores isolados.

Observamos que o índice de clorofila no T0 aumentou com as doses de silício chegando a 32,86 SPAD na dose de 200 kg ha^{-1} . O índice SPAD não variou no FS0, apresentando média entre as doses de 29,7 SPAD, entretanto, no final das avaliações os dados não se ajustaram a nenhuma equação testada e os valores mantiveram-se inferiores em todas as doses (Figura 6a). O índice SPAD para as plantas com irrigação intermitente não diferiu estatisticamente entre os períodos avaliados, ressalta-se que foi menor nas plantas com irrigação contínua ao final das avaliações, uma resposta atípica, pois a literatura comenta o efeito redutor da clorofila em plantas sob estresse hídrico (Figura 6b). Enfatizamos que no período final as plantas tanto com irrigação contínua quanto intermitente apresentaram redução do SPAD, reforçando a idéia da senescência.

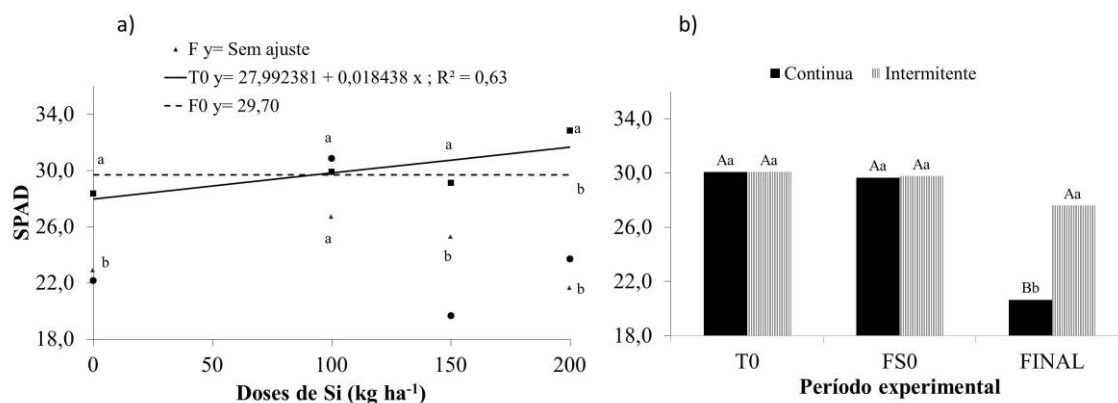


FIGURA 6. Índice de clorofila (SPAD) (a - b) de plantas de Chia (*Salvia hispanica L.*) em função de diferentes doses de silício associado ao déficit hídrico intermitente. Dourados, UFGD, 2019. Letras minúsculas comparam os períodos de avaliação dentro de cada dose de silício (a) (Tukey, $p < 0,05$). Letras maiúsculas comparam as condições de irrigação dentro de cada período de avaliação (t de Bonferroni, $p < 0,05$) e letras minúsculas comparam os períodos de avaliação dentro de cada condição de irrigação (Tukey, $p < 0,05$) (b).

A avaliação de CPA diferiu entre as doses apenas na avaliação FINAL e se manteve maior que em relação aos demais períodos, resultado esperado em função do crescimento da planta. Entretanto, a partir da dose 100 kg ha^{-1} o crescimento foi mais acentuado, chegando a $51,30 \text{ cm}$ na dose de 200 kg ha^{-1} . A avaliação final também obteve maiores valores de CPA em todas as doses de Si quando comparadas as avaliações de T0 e FS0, tanto nas plantas contínuas quanto intermitentes (Figura 7b e, c). Ressaltamos que na FS0 o crescimento da parte aérea reduziu significativamente nas plantas intermitentes, as quais após a retomada da irrigação aumentaram o crescimento, porém esses valores são inferiores aos das plantas contínuas.

Para o CR, verificamos diferenças entre as doses de silício apenas na avaliação inicial (T0), sendo que com o aumento das doses de silício proporcionou redução das raízes (Figura 8a). Esse resultado pode ter ocorrido por um efeito osmótico do silício na solução do solo, o que não foi percebido na avaliação FINAL, certamente porque, com o passar dos dias as irrigações foram lixiviando o silício. O CR reduziu significativamente nas plantas com irrigação intermitente na FS0, o qual representa um comportamento atípico, considerando que sob déficit hídrico a tendência é do sistema

radicular aumentar em resposta a efeitos hormonais desencadeada pela condição estressante. Entretanto, observa-se a retomada do crescimento das raízes com a reirrigação, conforme observado no período final de avaliação (Figura 8b).

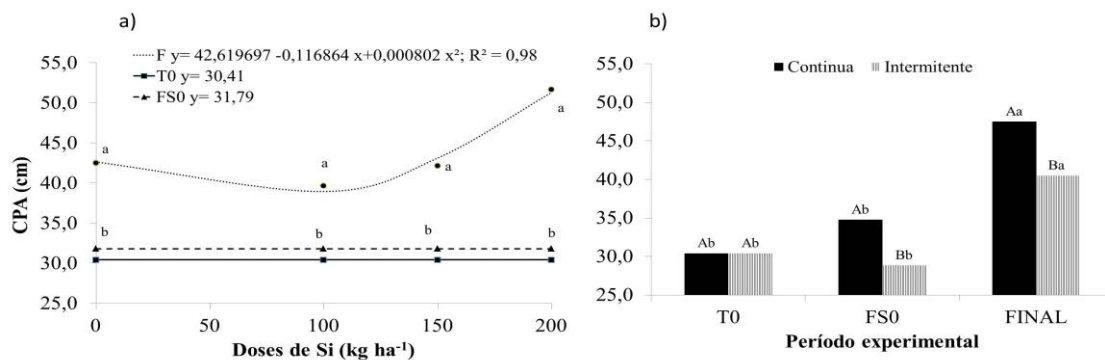


FIGURA 7. Comprimento da parte aérea (CPA) (a - b) de plantas de Chia (*Salvia hispanica L.*) em função de diferentes doses de silício associado ao déficit hídrico intermitente. Dourados, UFGD, 2019. Letras minúsculas comparam os períodos de avaliação dentro de cada dose de silício (a) (Tukey, $p < 0,05$). Letras maiúsculas comparam as condições de irrigação dentro de cada período de avaliação (t de Bonferroni, $p < 0,05$) e letras minúsculas comparam os períodos de avaliação dentro de cada condição de irrigação (Tukey, $p < 0,05$) (b).

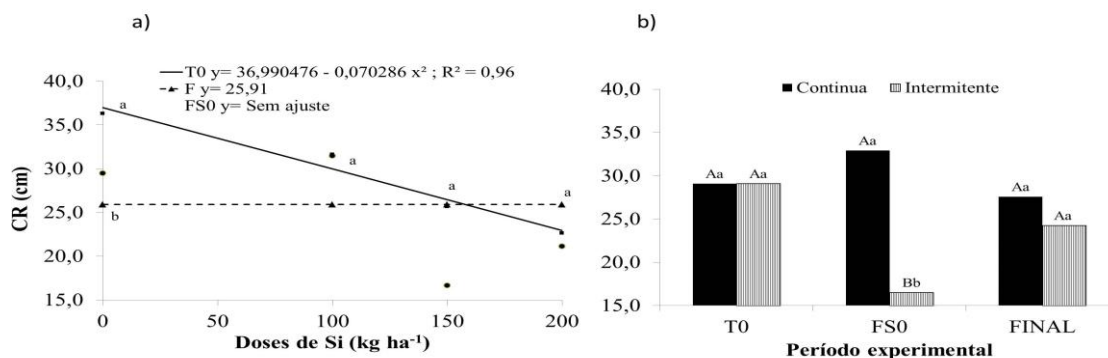


FIGURA 8. Comprimento de raiz (CR) (a - b) de plantas de Chia (*Salvia hispanica L.*) em função de diferentes doses de silício associado ao déficit hídrico intermitente. Dourados, UFGD, 2019. Letras minúsculas comparam os períodos de avaliação dentro de cada dose de silício (a) (Tukey, $p < 0,05$). Letras maiúsculas comparam as condições de irrigação dentro de cada período de avaliação (t de Bonferroni, $p < 0,05$) e letras minúsculas comparam os períodos de avaliação dentro de cada condição de irrigação (Tukey, $p < 0,05$) (b).

O aumento das doses de Si causou redução no DC, sendo esse mesmo comportamento observado nas plantas com irrigação intermitente e no período de FS0 (Figuras 9a, b, c). Entretanto, após a reirrigação, as plantas recuperaram os valores de DC.

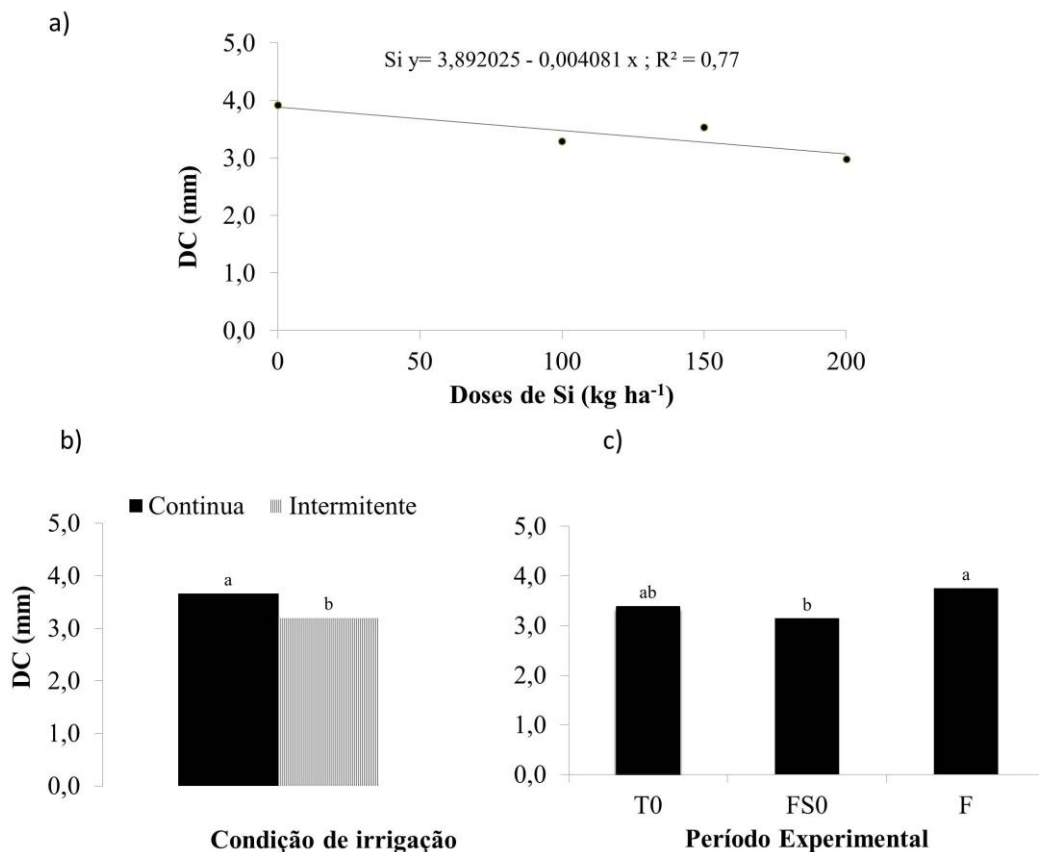


FIGURA 9. Diâmetro de colmo (DC) (a, b - c) de plantas de Chia (*Salvia hispanica L.*) em função de diferentes doses de silício associado ao déficit hídrico intermitente. Dourados, UFGD, 2019. Letras minúsculas comparam as condições de irrigação (a) (t de Bonferroni, $p < 0,05$). Letras minúsculas comparam os períodos de avaliação (b) (Tukey, $p < 0,05$).

As plantas com irrigação intermitente apresentaram menor NF e não variaram entre as doses de silício, apresentando média de 12,74 folhas, entretanto as plantas tratadas com dose superior a 100kg/ha de Si não variaram entre as condições de irrigação. O NF não variou entre os períodos de T0 e FS0, mas foi maior ao final das avaliações (16,04 folhas), uma resposta normal do crescimento e à reirrigação (Figura 10a, b).

As plantas em condições de déficit hídrico, para garantir a sobrevivência via manutenção dos processos metabólicos básicos, redistribuem os seus produtos da fotossíntese, deixando de destiná-los, por exemplo, para a formação e crescimento de folhas, brotos e até mesmo o aumento de área foliar (ARAÚJO et al., 2014).

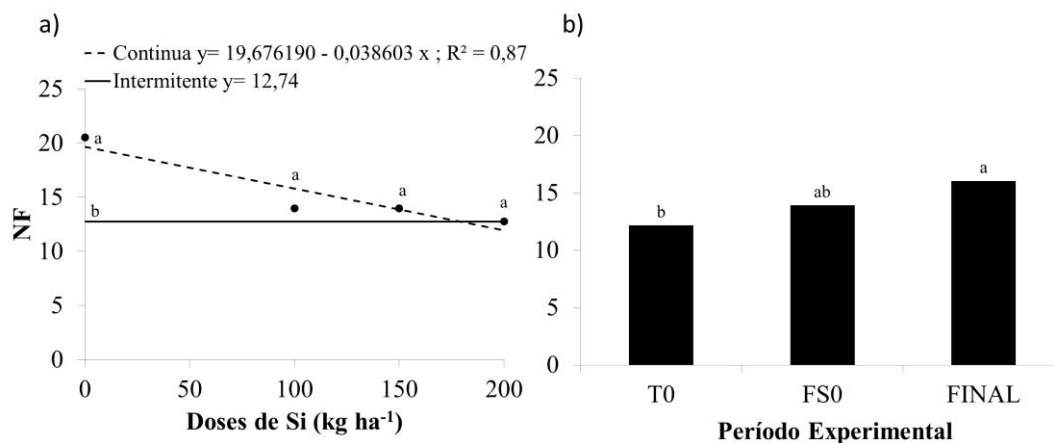


FIGURA 10. Número de folhas (NF) (a – b) de plantas de Chia (*Salvia hispanica L.*) em função de diferentes doses de silício associado ao déficit hídrico intermitente. Dourados, UFGD, 2019. Letras minúsculas comparam as condições de irrigação dentro de cada dose de silício (a) (t de Bonferroni, $p < 0,05$). Letras minúsculas comparam os períodos de avaliação (b) (Tukey, $p < 0,05$).

A MFPA teve efeito significativo apenas para os fatores isolados de condições de irrigação e períodos experimentais. Com relação aos períodos de avaliação não houve diferença entre T0 e FS0, mas o maior acúmulo de MFPA foi observado ao final das avaliações (10,77 g) e nas plantas submetidas à irrigação contínua (7,86 g). Esses resultados são atribuídos como resposta natural ao crescimento final das plantas e maior disponibilidade hídrica (Figura 11a, b).

A MSPA teve efeito significativo apenas da interação condições de irrigação e período experimental, sendo menor nos períodos do T0 e FS0. As plantas no final apresentaram maior MSPA, principalmente quando irrigadas continuamente, mas ressaltamos que as plantas com irrigação intermitentes responderam satisfatoriamente à reirrigação, mas mesmo assim, não alcançaram os valores das plantas com irrigação contínua (Figura 11c).

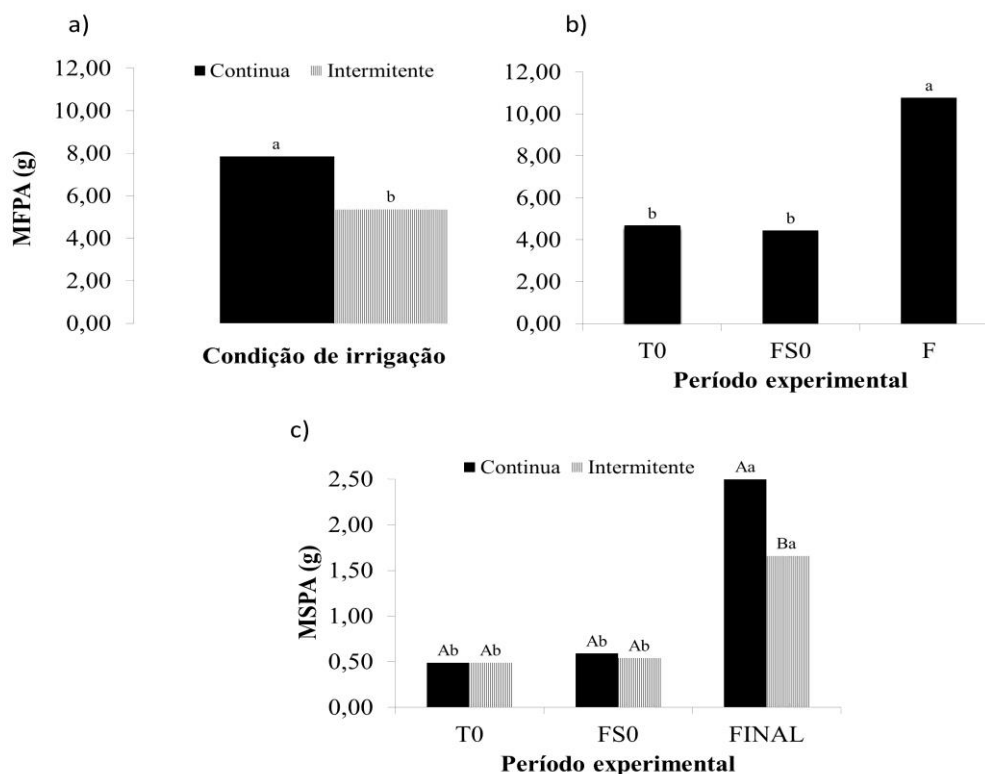


FIGURA 11. Massa fresca da parte aérea (MFPA) (a - b) e Massa seca da parte aérea (MSPA) (c) de plantas de Chia (*Salvia hispanica L.*) em função de diferentes doses de silício associado ao déficit hídrico intermitente. Dourados, UFGD, 2019. Letras minúsculas comparam as condições de irrigação (a) (t de Bonferroni, $p < 0,05$). Letras minúsculas comparam os períodos de avaliação (b) (Tukey, $p < 0,05$). Letras maiúsculas comparam as condições de irrigação dentro de cada período de avaliação (t de Bonferroni, $p < 0,05$) e letras minúsculas comparam os períodos de avaliação dentro de cada condição de irrigação (Tukey, $p < 0,05$) (c).

Para MFR observa-se efeito significativo da interação período experimental x condição de irrigação, sendo que na avaliação final as plantas apresentaram maiores valores com relação aos períodos T0 e FS0, com destaque para as plantas com irrigação contínua (11,43 g). As plantas na condição de irrigação intermitente ao FINAL das avaliações aumentaram a MSR (4,89 g), mas não alcançaram os valores das plantas com irrigação contínua (Figura 12a)

Para MSR a interação doses de Si x períodos de avaliação foi

significativa, entretanto somente ao final das avaliações as plantas responderam as diferentes doses de silício, com máxima de 118,30 kg ha⁻¹ (Figura 12b).

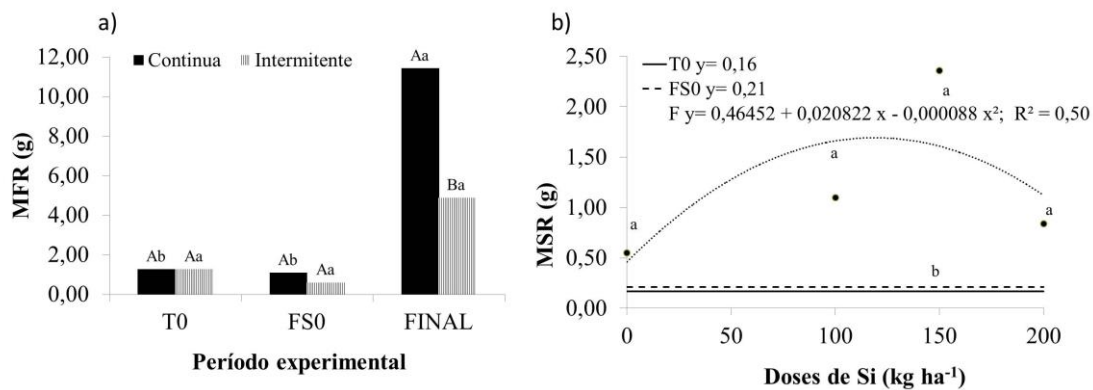


FIGURA 12. Massa fresca de raiz (MFR) (a) e Massa seca de raiz (MSR) (b) de plantas de Chia (*Salvia hispanica L.*) em função de diferentes doses de silício associado ao déficit hídrico intermitente. Dourados, UFGD, 2019. Letras maiúsculas comparam as condições de irrigação dentro de cada período de avaliação (t de Bonferroni, $p < 0,05$) e letras minúsculas comparam os períodos de avaliação dentro de cada condição de irrigação (a) (Tukey, $p < 0,05$). Letras minúsculas comparam os períodos de avaliação dentro de cada dose de silício (b) (Tukey, $p < 0,05$).

CONCLUSÃO

As plantas cultivadas sob irrigação contínua apresentaram maior crescimento de chia.

A dose de Si de 100 kg ha⁻¹ atenua o déficit hídrico, favorecendo a manutenção e a recuperação do metabolismo fotossintético das plantas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, E. C.; COSTA, R. S.; LOPES, E. C.; DAHER, R. F.; FERNANDES, M. E. B. Qualidade das mudas de espécies arbóreas de mangue cultivadas em viveiros e diferentes substrates. **Acta Ambiental Catarinense**, v. 11, n. 1, p. 21-32, 2014.

ASHARAF, M.; HARRIS, P. J. C. Photosynthesis under stressful environments: an overview. **Photosynthetica**, v. 51, n. 1, p. 163-190, 2013.

BAKER, N. R.; ROSENQVST, E. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 55, n. 403, p. 1607-1621, 2004.

CAHILL, J.P. Genetic diversity among varieties of chia (*Salvia hispanica* L.). **Genetic Resources and Crop Evolution**, Dordrecht, v.51, p.773-781, 2004.

CAMPELO, D. H.; LACERDA, C. F.; SOUSA, J. A.; CORREIA, D.; BEZERRA, A. M. E.; ARAÚJO, J. D. M.; NEVES, A. L. R. Trocas gasosas e eficiência do fotossistema II em plantas adultas de seis espécies florestais em função do suprimento de água no solo. **Revista Árvore**, v. 39, n. 1, p. 973-983, 2015.

CANTUÁRIO, F.S.; LUZ, J.M.Q.; PEREIRA A.I.A.; SALOMÃO L.C.; REBOUÇAS, T.N.H. Podridão apical e escaldadura em frutos de pimentão submetidos a estresse hídrico e doses de silício. **Horticultura Brasileira**, v.32, n.2, p.215-219, 2014.

COELHO, M.S.; SALAS-MELLADO, M.D.L.M. Revisão: Composição química, propriedades funcionais e aplicações tecnológicas da semente de chia (*Salvia hispanica* L) em alimentos. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v.17, n.4, p.259-268, 2014.

EGEA, G; VERHOEF, A; VIDALE, P. Towards an improved and more flexible representation of water stress in coupled photosynthesis-stomatal conductance models, **Agronomy Forest Meteorology**, 151, 1370–1384, 2011.

FLEXAS J, BARBOUR MM, BRENDELO, CABRERA HM, CARRIQUÍ M, DÍAZ-ESPEJO A, DOUTHE C, DREYER E, FERRIO JP AND GAGO J. Mesophyll diffusion conductance to CO₂: an unappreciated central player in photosynthesis. **Plant Science**. 193: 70-84. 2012.

FLEXAS, J.; RIBAS-CARBÓ, M.; BOTA, J.; GALMÉS, J.; HENKLE, M.; MARTÍNEZ-CAÑELLAS, S.; MEDRANO, H. Decreased Rubisco activity during water stress is not induced by decreased relative water content but related to conditions of low stomatal conductance and chloroplast CO₂ concentration. **New Phytologist**, v. 172, n. 1, p. 73-82, 2006.

FERREIRA, D.F. Sisvar: A computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v.35, n.6, p.1039-1042, 2011.

FERREIRA, T.R.B. **Caracterização nutricional e funcional da farinha de chia (*Salvia hispanica L.*) e sua aplicação no desenvolvimento de pães**. 2013. 112p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, São Paulo.

GONG, H. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. **Plant Science**, v. 169, n. 13-14, p. 313–321, 2005.

GUNES, A. INAL, A. COBAN, S. Silicon- mediated changes on some physiological and enzymatic parameters symptomatic of oxidative stress in barley grown in sodic-B toxic soil. **Journal of Plant Physiology**, v. 164, n. 6, p. 807-811, 2007.

HECKMAN. Silicon: a beneficial substance. **Better Crops**, v.97,n.4,p. 14-16. 2013.

JAMBOONSRI, W. et al. Extending the range of an ancient crop, *Salvia hispanica L.*-a new ω 3 source. **Genetic Resources and Crop Evolution**, Dordrecht, v.59, n.2, p.171-178, 2012.

PEI, Z.F; MING, D.F; LIU, D; WAN, G.L; GENG, X.X; GONG, H.J; ZHOU, W.J. Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum L.*) seedlings. **Journal of Plant Growth Regulation**, v.29, p.106-115, 2010.

ROSA, D.B.C.J. Estresse hídrico no crescimento e trocas gasosas em Muda de *Copaifera langsdorffii Desf.* Tese apresentada a Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Agronomia, 2017.

SANTANA, D. G; LOBO, G. A; SALOMÃO, A. N; PEREIRA, V. J. Robustness of germination analysis methods for *Copaifera langsdorffii Desf.* (fabaceae) seeds. **Bioscience Journal**, v. 32, n. 1, p. 160-171, 2016.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.M.; MURPHY, A. Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal. Artmed, 6ª ed. Porto Alegre-RS, 888 p. 2017.

XU, Z.; ZHOU, G.; SHIMIZU, H. Are plant growth and photosynthesis limited by predrought following rewatering in grass. **Journal of Experimental Botany**, v. 60, n. 13, p. 37-49, 2009.

ZHANG, S., LI, Q., MA, K., CHEN, L. Temperature dependent gas exchange and stomatal/non-stomatal limitation to CO₂ assimilation of *Quercus liaotungensis* under midday higher irradiance. **Photosynthetica**, v. 39, p. 383-388, 2001.

ZHU, Z. et al. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus L.*). **Plant Science**, v. 167, n. 2, p. 527-533, 2004.

CONCLUSÕES GERAIS

O silício mitigou o déficit hídrico para características de crescimento e a dose de silício de 100 kg ha^{-1} proporcionou maior eficiência nas trocas gasosas.

As plantas cultivadas sob irrigação contínua apresentaram maior crescimento e a dose de 100 kg ha^{-1} atenuou o déficit hídrico.

ANEXOS

ANEXO 1. Resumo da análise de variância para porcentagem de emergência (E%) e índice de velocidade de emergência (IVE) em função de diferentes níveis de silício e capacidades de retenção de água no solo para as duas épocas de semeadura, Dourados, UFGD, 2019.

FV	GL	QM			
		Época 1		Época 2	
		E%	IVE	E%	IVE
CRA	3	5140,00**	43,29**	375,00*	0,29 ns
Silício	4	798,33*	2,97 ns	23,33 ns	1,87*
CRA x Silício	12	537,22 ns	4,50*	177,77 ns	1,57**
Erro	40	280,00	2,21	131,66	0,64
CV %		45,22	65,71	12,45	18,63
Média		37,00	2,26	92,16	4,30

** Efeito significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

* Efeito significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

ns: não significativo

(FV) Fonte de variação

(GL) Graus de liberdade

(CV) Coeficiente de variação

(QM) Quadrado médio

ANEXO 2. Resumo da análise de variância para taxa fotossintética (A), transpiração foliar (E), condutância estomática (gs), concentração interna de CO₂ (Ci), eficiência instantânea do uso da água (A/E), eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s), eficiência de carboxilação da Rubisco (A/Ci) em função de diferentes níveis de silício e capacidades de retenção de água no solo para as duas épocas de semeadura, Dourados, UFGD, 2019.

Época 1								
FV	GL	QM						
		<i>Ci</i>	<i>E</i>	<i>G_s</i>	<i>A</i>	<i>EUA</i>	<i>A/Ci</i>	<i>EiUA</i>
CRA	2	798,06*	1,47 ns	0,002 ns	2,54 ns	0,29**	0,00008 ns	258,41 ns
Silício	4	451,76 ns	5,98**	0,012**	20,33**	0,53**	0,00019 ns	35,04 ns
CRA x Silício	8	816,26**	4,46**	0,010**	15,20**	0,16**	0,00020 ns	1986,25*
Erro	30	203,90	0,86	0,002	3,20	0,05	0,00010	2662,69
CV %		5,24	13,38	23,56	16,37	14,69	31,38	17,75
Média		272,73	6,94	0,210	10,93	1,56	0,04	53,06
Época 2								
FV	GL	QM						
		<i>Ci</i>	<i>E</i>	<i>G_s</i>	<i>A</i>	<i>EUA</i>	<i>A/Ci</i>	<i>EiUA</i>
CRA	2	930,06 ns	7,89**	0,016**	41,10**	2,15**	0,00060**	1115,31**
Silício	4	1881,07*	8,25**	0,001 ns	7,80*	6,58**	0,00010 ns	102,40 ns
CRA x Silício	8	3105,34**	1,53 ns	0,002*	5,63*	4,05*	0,00010*	179,57 ns
Erro	30	589,73	1,29	0,031	2,17	4,88	0,00007	98,53
CV %		8,82	17,89	13,87	13,70	22,26	20,64	20,96
Média		275,46	6,36	0,230	10,75	1,81	0,04	47,35

** Efeito significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

* Efeito significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

ns: não significativo

(FV) Fonte de variação

(GL) Graus de liberdade

(CV) Coeficiente de variação

(QM) Quadrado médio

ANEXO 3. Resumo da análise de variância para fluorescência inicial (F0), eficiência quântica potencial do fotossistema II (Fv/Fm), conteúdo relativo de água nas folhas (CRAf), comprimento da parte aérea (CPA), comprimento da raiz (CR), diâmetro de colmo (DC), índice de clorofila (SPAD), número de folhas (NF), área foliar (AF), massa fresca de parte aérea (MFPA), massa fresca de raiz (MFR), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR) em função de diferentes níveis de silício e capacidades de retenção de água no solo para a época 1, Dourados, UFGD, 2019.

Época 1								
FV	GL	QM						
		F0	Fv/Fm	CRAf	SPAD	CPA	CR	DC
CRA	2	0,0008 ns	0,047**	3067,56**	10,43 ns	868,43**	264,08 ns	1,98**
Silício	4	0,0007 ns	0,012 ns	622,31**	7,69 ns	289,39*	344,20 ns	0,66**
CRA x Silício	8	0,0011*	0,024*	502,28**	4,49 ns	125,56 ns	219,34 ns	0,44**
Erro	30	0,0004	0,037	68,110	5,34	89,78	297,85	0,02
CV %		13,29	5,24	19,51	6,89	33,35	54,98	9,66
Média		0,15	0,67	42,300	33,54	28,41	31,38	1,76

Época 1							
FV	GL	QM					
		AF	NF	MFPA	MFR	MSPA	MSR
CRA	2	1377,29**	44,15**	32,16**	8,46 ns	1,53*	0,12 ns
Silício	4	3994,85**	90,18**	9,62 ns	6,50 ns	0,53 ns	0,11 ns
CRA x Silício	8	2636,83**	20,48**	8,08 ns	5,04 ns	0,45 ns	0,06 ns
Erro	30	200,82	4,04	5,43	3,01	0,34	0,05
CV %		28,91	16,28	85,18	12,73	9,76	10,87
Média		49,020	12,35	2,73	1,36	0,60	0,22

** Efeito significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

* Efeito significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

ns: não significativo

(FV) Fonte de variação

(GL) Graus de liberdade

(CV) Coeficiente de variação

(QM) Quadrado médio

ANEXO 4. Resumo da análise de variância para fluorescência inicial (F0), eficiência quântica potencial do fotossistema II (Fv/Fm), conteúdo relativo de água nas folhas (CRAf), comprimento da parte aérea (CPA), comprimento da raiz (CR), diâmetro de colmo (DC), índice de clorofila (SPAD), número de folhas (NF), área foliar (AF), massa fresca de parte aérea (MFPA), massa fresca de raiz (MFR), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR) em função de diferentes níveis de silício e capacidades de retenção de água no solo para a época 2, Dourados, UFGD, 2019.

Época 2								
FV	GL	QM						
		F0	Fv/Fm	CRAf	SPAD	CPA	CR	DC
CRA	2	0,0014*	0,100**	4613,47**	7,85 ns	304,85**	66,51*	0,63**
Silício	4	0,0008 ns	0,017**	1612,41**	29,94**	37,48 ns	30,82 ns	0,60**
CRA x Silício	8	0,0011**	0,010**	168,88**	3,01 ns	26,97 ns	16,66 ns	0,23**
Erro	30	0,0003	0,001	34,520	5,31	15,29	17,05	0,03
CV %		12,77	6,25	11,12	7,12	14,69	17,02	10,60
Média		0,14	0,67	52,820	32,36	26,61	24,26	1,69

Época 2								
FV	GL	QM						
		AF	NF	MFPA	MFR	MSPA	MSR	
CRA	2	3953,87**	84,68**	6,17**	3,36**	0,25**	0,19**	
Silício	4	13868,46**	64,46**	2,85**	1,90*	0,12*	0,12**	
CRA x Silício	8	2971,50**	15,71**	1,09 ns	0,42 ns	0,07 ns	0,02 ns	
Erro	30	492,84	3,37	0,66	0,51	0,03	0,02	
CV %		24,99	14,54	35,99	53,50	44,01	61,78	
Média		88,840	12,64	2,27	1,34	0,45	0,27	

** Efeito significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

* Efeito significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

ns: não significativo

(FV) Fonte de variação

(GL) Graus de liberdade

(CV) Coeficiente de variação

(QM) Quadrado médio

ANEXO 5. Resumo da análise de variância para taxa fotossintética (A), concentração interna de CO₂ (Ci), eficiência intrínseca do uso da água (A/g), eficiência de carboxilação da Rubisco (A/Ci) em função de diferentes níveis de silício associados ao déficit hídrico intermitente, Dourados, UFGD, 2019.

FV	GL	QM			
		A	Ci	EiUA	A/Ci
Irrigação	1	16,24*	583,68 ns	4590,73**	0,0001 ns
Silício	3	2,86 ns	29549,46**	1529,67 ns	0,0002 ns
Periodo	2	862,25**	6303,79 ns	2602,14*	0,0076 **
Irrig x Silício	3	6,90*	31650,70**	4823,70**	0,0006**
Irrig x Periodo	2	14,33**	6036,58 ns	1923,68*	0,0006*
Silício x Periodo	6	9,96**	33543,10**	2339,88**	0,0005**
CV %		21,56	18,28	43,04	42,00
Média		7,08	298,59	54,8	0,027

** Efeito significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

* Efeito significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

ns: não significativo

(FV) Fonte de variação

(GL) Graus de liberdade

(CV) Coeficiente de variação

(QM) Quadrado médio

ANEXO 6. Resumo da análise de variância para fluorescência inicial (F0), comprimento da parte aérea (CPA), comprimento da raiz (CR), índice de clorofila (SPAD), diâmetro de colmo (DC), número de folhas (NF), massa fresca de parte aérea (MFPA), massa fresca de raiz (MFR), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR) em função de diferentes níveis de silício associados ao déficit hídrico intermitente, Dourados, UFGD, 2019.

FV	GL	QM					
		F0	Fv/Fm	CPA	CR	SPAD	DC
Irrigação	1	0,01*	0,006 ns	333,68**	780,12**	98,70**	3,82**
Silício	3	0,01**	0,014 ns	46,34 ns	260,23**	45,57**	2,83**
Periodo	2	0,53**	0,009 ns	1341,76**	122,51 ns	267,01**	2,28*
Irrig x Silício	3	0,01*	0,0009 ns	51,45 ns	114,19 ns	25,45**	1,13 ns
Irrig x Periodo	2	0,01**	0,007 ns	85,18 ns	451,79**	94,88**	1,36 ns
Silício x Periodo	6	0,01**	0,006 ns	89,26*	149,18*	61,56**	1,06 ns
CV %		18,05	12,24	14,91	28,22	11,22	20,65
Média		0,24	0,62	35,4	26,56	27,96	3,43
FV	GL	QM					
		NF	MFPA	MFR	MSPA	MSR	
Irrigação	1	120,12**	110,48**	98,35*	1,56 ns	0,84 ns	
Silício	3	79,12**	14,05 ns	29,66 ns	0,26 ns	1,33 ns	
Periodo	2	90,37**	309,46**	402,96**	19,20**	8,42**	
Irrig x Silício	3	37,27*	25,16 ns	9,75 ns	0,27 ns	0,19 ns	
Irrig x Periodo	2	33,04 ns	32,12 ns	79,33 ns	1,31*	0,99 ns	
Silício x Periodo	6	12,20 ns	9,44 ns	21,25 ns	0,42 ns	1,28*	
CV %		24,76	54,42	13,89	59,73	13,62	
Média		14,04	6,62	3,43	1,05	0,53	

** Efeito significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

* Efeito significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

ns: não significativo

(FV) Fonte de variação

(GL) Graus de liberdade

(CV) Coeficiente de variação

(QM) Quadrado médio

ANEXO 7. Emergência em função de diferentes de capacidades de retenção de água (25, 50, 75 e 100%), Dourados, UFGD, 2019.



ANEXO 8. Avaliação na fotossíntese próximo de zero (FS0) para o ensaio do déficit hídrico intermitente em função das doses de silício aplicada (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹) Dourados, UFGD, 2019.



F0:

0 Si

50 Si

100 Si

150 Si

200 Si