

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

MARCUS VINÍCIUS DE MATTOS BORTONIO

ASSOCIAÇÃO DE FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES E SILÍCIO
AMENIZAM ESTRESSE HÍDRICO NA PRODUTIVIDADE DA SOJA

MONTE CARMELO
2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

MARCUS VINÍCIUS DE MATTOS BORTONIO

ASSOCIAÇÃO DE FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES E SILÍCIO
AMENIZAM ESTRESSE HÍDRICO NA PRODUTIVIDADE DA SOJA

Trabalho de Conclusão apresentado ao curso de
Agronomia da Universidade Federal de
Uberlândia, Campus Monte Carmelo, como
requisito necessário para a obtenção do grau de
Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Douglas José Marques

MONTE CARMELO
2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

MARCUS VINÍCIUS DE MATTOS BORTONIO

ASSOCIAÇÃO DE FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES E SILÍCIO
AMENIZAM ESTRESSE HÍDRICO NA PRODUTIVIDADE DA SOJA

Monte Carmelo, 05 de dezembro de 2023

Banca Examinadora

Prof. Dr. Douglas José Marques
Orientador

Prof. Dr. Eusímio Felisbino Fraga Júnior
Membro da Banca

Marco Iony dos Santos Fernandes.
Membro da Banca

MONTE CARMELO
2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer a Deus por me permitir viver essa etapa da minha vida com saúde e por ser sempre guiar e cuidar dos meus passos.

Um grande agradecimento à Universidade Federal de Uberlândia pela oportunidade de realizar minha graduação em Agronomia com alta qualidade de ensino e grande prestígio que esta instituição possui.

Quero agradecer ao meu pai, Carlos Rogério Bortonio, por ser referência nas minhas escolhas, me apresentando o mundo do agronegócio e o valor do trabalho do homem honesto. A minha mãe, Luciana Lemos de Mattos Bortonio, que sempre me orientou e cuidou com amor, demonstrando a mim o poder da oração e importância do caminho com Deus. Por fim, meu irmão João Pedro de Mattos Bortonio por sua calma, coragem e determinação que sempre me inspiraram. Juntos em família chegamos até aqui.

A meus avós Antonio, Maria Nazareth, Terezinha e em especial, meu avô Orlando (*in memoriam*) que me inspirava com suas histórias de vida e que jamais serão esquecidas.

Ao meu amigo, professor e orientador do experimento e TCC, Douglas José Marques, que tem total influência na apresentação desse trabalho. Obrigado por toda orientação e conselhos ministrados.

Aos meus companheiros de experimento e grande amigos Matheus Vieira Mazzutti e Fernando Pinheiro, que juntos implementamos o projeto em campo e executamos cada atividade com empenho e disciplina, aprendendo muito um com o outro, tornando o experimento divertido, alegre e descontraído.

Aos amigos colaboradores diretos e indiretos desse projeto, em especial: Henrique Meirelles Munari, Marcelo Aguiar da Costa, Marco Iony, João Rodolfo, Bruno Pinheiro e Heslen Cardoso.

Aos amigos Lucas Pascuti e Bruno Kitaya por tornarem a graduação uma etapa que vale a pena ser vivida.

Aos grupos que pertenci durante a graduação: NESF, CinCi e PET, aos colegas desses grupos que tanto participaram de meu processo de crescimento. Em especial, ao orientador e fundador do CinCi, Eusímio, por me orientar e inspirar a ser um grande profissional.

E por fim, um agradecimento especial a Ana Carolina Bento Ferreira, pelo carinho e cuidado que tem comigo, tornando a minha vida mais leve e feliz.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	7
2 OBJETIVOS.....	7
3 REVISÃO DE LITERATURA	8
3.1 Importância Econômica Da Soja	8
3.2 Déficit hídrico e o metabolismo da soja	8
3.3 Uso do silício na amenização do déficit hídrico.....	10
3.4 Uso de fungos micorrízicos arbusculares na amenização do estresse hídrico.....	11
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	11
4.1 Condições experimentais	11
4.2 Caracterização do solo.....	13
4.3 Correção do solo e fertilização	14
4.4 Irrigação.....	15
4.5 Inóculo de FMA	18
4.6 Delineamento experimental.....	18
4.7 Avaliações	19
4.7.1 Volume de raiz.....	19
4.7.2 Índice de área foliar	19
4.7.3 Avaliação fisiológica	20
4.7.3.1 Eficiência no uso da água.....	20
4.7.3.2 Produtividade da soja.....	20
4.8 Genótipo da cultura	21
4.9 Análises estatísticas	21
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	21
6 CONCLUSÃO.....	25
REFERÊNCIAS	26

RESUMO

A agricultura enfrenta diversos desafios, sendo o estresse hídrico um dos maiores gargalos para se produzir. Neste contexto, a soja é um dos principais produtos agrícolas da produção brasileira. O Brasil, por se tratar de um país tropical, enfrenta fatores abióticos como as secas e as altas temperaturas. Frente a esta problemática, é necessário que se encontre soluções para assegurar a produção agrícola e a segurança alimentar. A hipótese desta pesquisa é que os efeitos da associação de silício e fungos micorrízicos arbusculares (FMA) em plantas de soja possam mitigar os efeitos ocasionados pelo estresse hídrico. Sendo assim, o objetivo do trabalho é estudar alternativas para amenizar os efeitos da seca em diferentes níveis, associando Si e FMA e analisando parâmetros fisiológicos, produtividade e metabolismo. Dessa forma, o trabalho foi realizado em estufa, na localidade de Monte Carmelo-MG, pertencente ao bioma Cerrado. Os tratamentos realizados foram com silício e fungos micorrízicos arbusculares, em presença e ausência, e com diferentes lâminas de irrigação por gotejamento. Os parâmetros avaliados foram volume de raiz, índice de área foliar, eficiência no uso da água e produtividade. Concluiu-se com a pesquisa que houve efeito do aumento da água na produtividade da soja independente da presença e ausência de FMA e Si. Nas menores reposições de água 40 e 70% incrementaram na produtividade da soja na presença da associação de Si e FMA, aumentando a eficiência no uso da água.

PALAVRAS-CHAVE

Palavras-chave: lâminas de irrigação; estresse hídrico; eficiência do uso da água.

1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max L.*) é uma das culturas mais importantes para a agricultura brasileira, entretanto, sua produtividade é afetada em função da disponibilidade de água no solo. Ademais, as variações climáticas podem ocasionar o estresse hídrico e são um fator limitante para a produção de soja no Brasil (CHAVARRIA, 2015).

O silício não é um elemento essencial para a nutrição fisiológica vegetal, porém é um mineral benéfico que atribui características de resistência às plantas. Esse nutriente diminui a perda de água, possibilita maior resistência mecânica às células vegetais, possibilita maior resistência a pragas e doenças, diminui o efeito tóxico de outros nutrientes e contribui para a manutenção da taxa fotossintética (NUNES, 2019).

Os fungos micorrizicos arbusculares (FMA) são capazes de amenizar os efeitos do estresse hídrico por meio da associação com a planta, garantindo produtividade (LARA, 2020). Destaca-se que os microrganismos melhoram o aproveitamento dos nutrientes e dos recursos hídricos por meio das suas estruturas denominadas hifas (JUNIOR, 2023).

As restrições hídricas causadas pelas adversidades climáticas geram prejuízos à atividade agrícola, principalmente em regiões áridas e semiáridas, representando um perigo para a segurança alimentar. Mediante às instabilidades climáticas, como mudanças drásticas no regime de chuvas, todos os países produtores correm grandes riscos em suas produções agrícolas (NETO, 2021).

Diante desse cenário, é necessário criar alternativas para mitigar o estresse hídrico na soja e garantir a produtividade e a segurança alimentar dos diversos países que dependem da cadeia produtiva da leguminosa, diminuindo possíveis instabilidades na distribuição de alimentos. Dessa forma, o uso de Si e FMA representam estratégias para a amenização do estresse hídrico na cultura afim de garantir produtividade.

2 OBJETIVOS

Sendo assim, o objetivo da pesquisa é investigar alternativas para amenizar os efeitos do estresse hídrico na cultura da soja, através da associação Si e FMA avaliando os aspectos da raiz, índice de área foliar, eficiência no uso da água e produtividade.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Importância Econômica Da Soja

A soja representa a maior fatia de exportação do agronegócio brasileiro contribuindo com mais de dez bilhões de dólares para o Produto Interno Bruto do país (EMBRAPA, 2021). A agricultura brasileira emprega atualmente 28,3 milhões de trabalhadores, sendo a cultura da soja um dos pilares que mantém o funcionamento do sistema de produção agrícola nacional (CEPEA, 2023).

O grande impacto gerado na economia se deve a grande produção nacional da oleaginosa no Brasil, que na safra 2022/2023 atingiu 154 milhões de toneladas (EMBRAPA, 2023). Esse cenário de alta produção foi construído pela expansão da agricultura no cerrado brasileiro, com destaque para o estado do Mato Grosso com produção superior a 45 milhões de toneladas na safra 2022/23 (EMBRAPA, 2023).

Essa produção gera empregos em diversos outros setores além da agricultura, dentre eles o setor de transporte, visto que a soja necessita de um grande sistema de escoamento. Dessa forma, os produtos da safra da soja são escoados pelos mais diversos sistemas de transporte ao longo do Brasil, com destaque para os sistemas rodoviário e ferroviário que escoam 65% e 25% da produção, respectivamente (CNA, 2020).

A produção da soja também reflete sua importância impactando no espaço geográfico do território nacional, já que a cultura ocupa uma área superior a 44 milhões de hectares no ao longo do Brasil em 2023, representando 68,75% da área total cultivada no país (EMBRAPA, 2023).

No cerrado mineiro, a oleaginosa ocupa uma área agrícola superior a 2,17 milhões hectares que é responsável pela produção de aproximadamente 8.346 mil toneladas na safra 2022/23, o que representa uma média produtiva de 64 sacas/ha (CONAB, 2023).

3.2 Déficit hídrico e o metabolismo da soja

O clima é um fator determinante para a produtividade da soja, correspondendo ao fator de maior influência na oscilação das produções anuais (CASAGRANDE, 2001). A variabilidade climática pode ocasionar períodos de chuvas irregulares e variações nos aspectos de temperatura e umidade, colaborando para o déficit hídrico, o que causa alterações morfológicas na soja e acarreta plantas pouco desenvolvidas, porte menor, entrenós mais curtos e área foliar reduzida (FERRARI; PAZ; SILVA, 2015).

A oscilação na disponibilidade de água no solo, ocasionada pela irregularidade pluviométrica, influencia diretamente na formação vegetal da cultura no período pós semeadura, gerando problemas de desenvolvimento nos estádios iniciais (FERRARI; PAZ; SILVA, 2015). A germinação, quando ocorre sob déficit hídrico, afeta o porte da soja, pois o período germinativo é a etapa de maior influência sobre o estande da lavoura (CASAGRANDE, 2001).

A falta de água também afeta a qualidade da produção de sementes, visto que as plântulas cuja semente é originada de plantações de soja sob estresse hídrico, apresentam menor índice de germinação e vigor (FERRARI; PAZ; SILVA, 2015).

O estresse hídrico ocasiona níveis diferentes de impacto ao longo do ciclo fenológico da soja, sendo o florescimento o período mais crítico para o metabolismo, pois ocasiona abortamento de flores, redução no número de vagens e menor qualidade no preenchimento dos grãos (GAVA, 2016). O estágio de floração é o período de maior influência sobre a produtividade, pois nesta etapa o estresse de seca reduz diretamente o número de vagens, grãos por vagem e peso de grãos de cada planta (AGOSTINETTO, 2020).

A água corresponde a 90% da massa vegetal e está diretamente envolvida em todos os processos fisiológicos e bioquímicos no metabolismo das plantas. Ela possui funções vitais para a fisiologia da soja, pois atua na regulação térmica com a distribuição do calor, oferece suporte mecânico e comporta-se como solvente dentro das células permitindo que minerais, gases e solutos possam se locomover (SOUZA, 2013).

A necessidade hídrica das plantas é orientada pela evapotranspiração na qual ocorre a perda de água para atmosfera. Nesse caso, o solo tem papel fundamental na reposição de água para o organismo vegetal. Quando a planta possui água suficiente em seu metabolismo, conferindo turgescência celular, ocorre a abertura dos estômatos e permitindo o crescimento e desenvolvimento das células (FERRARI; PAZ; SILVA, 2015).

Em altos níveis de estresse hídrico, ocorre o fechamento dos estômatos para evitar a perda evaporativa, o que prejudica a assimilação de gás carbônico, que é um elemento fundamental para a realização da fotossíntese. Com a redução do processo fotossintético, a

planta possui menor crescimento vegetativo, afetando o número de ramos e consequentemente a quantidade de vagens (FERRARI, 2015).

As características edafoclimáticas e a época de semeadura da região produtora influenciam diretamente capacidade produtiva da soja, pois além da disponibilidade hídrica, a intensidade luminosa é outro fator fundamental para as reações bioquímicas que ocorrem na planta. Altas taxas de luminosidade podem ocasionar a saturação luminosa, diminuindo a eficiência no uso da radiação solar no metabolismo vegetal (GRZEGOZEWSKI, 2017).

3.3 Uso do silício na amenização do déficit hídrico

O silício (Si) é um mineral benéfico ao organismo da planta, apesar de não ser considerado um elemento essencial para a nutrição vegetal. O Si é absorvido em conjunto com a água via fluxo de massa pelas raízes da planta e se destina às partes de maior transpiração, principalmente nos tricomas das folhas (NUNES, 2019).

A passagem do silício, que ocorre das raízes até a parte aérea, ocorre pelo xilema. Ao chegar nas folhas, o silício é depositado na parede celular na forma de sílica amorfa hidratada, formando uma dupla camada silicatada e se torna imóvel no organismo da planta (DOS REIS MOREIRA, 2010).

Na planta, o silício oferece maior rigidez na estrutura dos tecidos, atua na regulação osmótica e aumenta a eficiência no uso da água para fotossíntese (SANTOS, 2022). Como o Si oferece rigidez aos tecidos vegetais, as folhas ficam mais eretas diminuindo o auto sombreamento, reduzem o acamamento das plantas e aumenta tolerância a estresses hídricos e geada (PEREIRA JÚNIOR, 2010).

Outros benefícios causados pelo uso de silício são maior resistência a pragas e doenças, diminuição da toxicidade de Ferro (Fe), Manganês (Mn) e outros metais pesados, aumento do metabolismo de nutrição e melhor absorção de nutrientes (NUNES, 2019).

A essencialidade do silício é um tema muito discutido na literatura científica, pois possui efeitos fisiológicos positivos para o metabolismo vegetal, porém com atividades bioquímicas controversas. Esse nutriente é o segundo elemento mais abundante no solo, entretanto, com a intensa exportação agrícola, faz-se necessário sua reposição (CASSEL, 2021).

Segundo Bakhat (2018), o silício é encontrado em proporções maiores nos tecidos vegetais em comparação com alguns macronutrientes essenciais como fósforo, cálcio e

magnésio. A importância desse elemento para a estrutura vegetal é demonstrada também quando é utilizado na adubação resultando em maiores produções de biomassa nas plantas.

Na utilização agrícola, o silício pode ser aplicado ao solo por meio do silicato de cálcio, cuja formulação química é $\text{Ca}_2\text{O}_4\text{Si}$, que além dos benefícios do mineral à planta, possui capacidade corretiva da acidez do solo, pois forma hidroxilas que neutralizam os íons H^+ da solução do solo (SOUZA, 2015).

3.4 Uso de fungos micorrízicos arbusculares na amenização do estresse hídrico

Os FMA são microrganismos que possuem ação facilitadora na ligação entre a planta e os nutrientes de solo, colonizando as raízes das plantas e aumentando a eficiência da adubação. Estes fungos são simbioses obrigatórios e efetuam simbioses mutualísticas com cerca de 80% das espécies vegetais, incluindo a soja (BERRUTI, 2016).

Os micélios dos fungos micorrízicos crescem e se expandem em torno do sistema radicular, aumentando a superfície de absorção de nutrientes para a planta e alcançando volumes de solo que não estão na área de alcance das raízes. Dessa forma, os FMA atuam como extensão das raízes aumentando a quantidade de água e minerais absorvidos (BERRUTI, 2016).

A relação dos FMA com as plantas são estabelecidas através de relação mutualística na qual os fungos oferecem água e minerais, como o fósforo e o nitrogênio. Em troca disso, as plantas oferecem aos microrganismos produtos fotossintéticos, tais como carbono fixado (GENRE, 2020).

A simbiose ocasiona diversos benefícios às plantas como melhor eficiência na absorção de nutrientes, melhor condicionamento fisiológico em situações de déficit hídrico e amenização de efeitos causados por estresses abióticos (DE OLIVEIRA, 2019).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Condições experimentais

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do tipo arco, coberta com filme plástico de 150 micras aditivado e as laterais revestidas com tela branca do tipo antiafídeo. A casa de vegetação está localizada no Campo Demonstrativo e Experimental – CaDEX, da Universidade Federal de Uberlândia, Campus de Monte Carmelo-MG (18°43'36.26"S; 47°31'28.50"O; 903m).

A soja foi cultivada em vasos de polietileno com volume de 8,5 litros com altura de vaso de 23,6 cm, onde foram preenchidos com 13 kg de solo. A condução do experimento se deu nos meses de maio a setembro de 2023, com a semeadura realizada no dia 23 de maio e a colheita no dia 21 de setembro.

Os tratamentos foram diferenciados com presença (+) e ausência (-) de silício (si) e fungos micorrízicos arbusculares (FMA), sendo as combinações FMA+Si+, FMA+Si-, FMA-Si- e FMA-Si+. Diante disso, foram diferenciadas as disposições hídricas em 4 níveis quantitativos diferentes.

A coleta da temperatura e umidade relativa do ar registradas na casa de vegetação durante os últimos 60 dias do período de condução do experimento estão apresentadas na Figura 1, onde eram coletados diariamente os valores máximos e mínimos destes parâmetros.

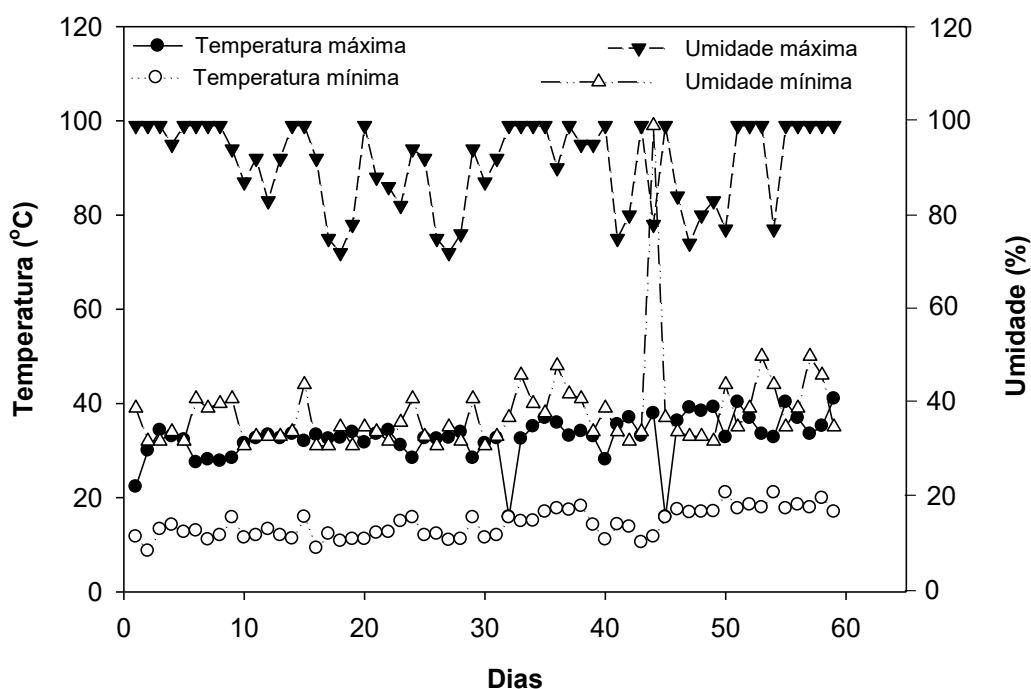


Figura 1. Temperatura máxima, média, mínima e umidade relativa do ar registradas na casa de vegetação durante o período de condução do experimento.

4.2 Caracterização do solo

O solo utilizado para preencher os vasos foi um Latossolo Vermelho Distrófico, coletado na camada de 0-20 cm, em uma área adjacente a vegetação nativa do bioma Cerrado, no município de Monte Carmelo-MG (18°32'33,76"S; 47°29'10,65"O; 799 m). Para a caracterização química (Tabela 1), foram coletadas cerca de 20 amostras simples, que foram homogeneizadas para retirada uma amostra composta, a qual foi submetida a análise no Laboratório Brasileiro de Análises Agrícolas (LABRAS).

Tabela 1. Características químicas e físicas das texturas do solo (LVd) antes da adubação do plantio.

Química ¹	unidades	LVd
pH in H ₂ O		4,99
pH		4,27
P	mg dm ⁻³	0,59
K	mg dm ⁻³	27,22
Ca	cmolc dm ⁻³	0,33
Mg	cmolc dm ⁻³	0,20
Al	cmolc dm ⁻³	0,41
H+Al	cmolc dm ⁻³	4,13
SB	cmolc dm ⁻³	13
t	cmolc dm ⁻³	2,21
T	cmolc dm ⁻³	17,3
V	%	64
m	%	1,4
MO	dag kg ⁻¹	0,45
B	mg dm ⁻³	0,16
Cu	mg dm ⁻³	1,16
Fe	mg dm ⁻³	50,1

Mn	mg dm ⁻³	11,84
Zn	mg dm ⁻³	0,62
Física²		
Argila	%	31
Silte	%	2
Areia	%	67

¹pH em água (1:2,5), P e K por extração de Mehlich I, Mg e Al extraíveis por solução de KCl 1 M; P na solução de equilíbrio (EP); teor de matéria orgânica (MO) e carbono orgânico (CO). saturação por bases (SB); T = Capacidade de troca catiônica em pH 7,0; t= Capacidade de troca catiônica efetiva; m = índice de saturação de alumínio; V = Índice de saturação por bases. ²A granulometria do solo foi determinada pelo método da pipeta.

Para a análise físico-hídrica, foi coletada uma amostra indeformada em um vaso aleatório na profundidade de 10 cm com o auxílio de um anel de aço inoxidável de 50 mm de diâmetro. A partir da análise da amostra indeformada, foi construída a curva de retenção de água do solo pelo ajuste dos dados ao modelo de van Genutchen.

4.3 Correção do solo e fertilização

As doses de Si utilizadas foram calculadas para corrigir a acidez do solo, conforme recomendado por Van Raij (1997). Após a aplicação de Si nas concentrações utilizadas nos tratamentos, o solo foi incubado por 28 dias. Como fonte de CaSiO₃, foi utilizado um reagente puro (CaO = 12%, SiO₂ = 78%) de silicato de cálcio recomendado para correção do solo. Para a fertilização do solo, foram aplicadas as quantidades recomendadas por (Tabela 2).

Tabela 2. Nutrientes, quantidades recomendadas e fontes utilizadas na fertilização de base deste estudo.

Nutriente	Concentração (mg kg solo ⁻¹)	Fontes
N	5,0	NH ₄ H ₂ PO ₄
P	300	KH ₂ PO ₄
K	200	KH ₂ PO ₄
S	40	K ₂ SO ₄
Mg	46	MgSO ₄ ·7H ₂ O
Mn	3,0	MnSO ₄
Cu	7,5	CuSO ₄ ·5H ₂ O
Mo	0,5	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4 H ₂ O
Zn	2,5	ZnSO ₄ ·7H ₂ O

Também foram feitas 3 adubações de cobertura (67,5g de Cloreto de Potássio/1,5L de água e 35g de Ureia/1,5L de água).

4.4 Irrigação

A aplicação das condições de estresse hídrico iniciou-se 30 dias após a semeadura, quando todas as plantas se encontravam em pleno desenvolvimento e continuou até o final do período de coleta de dados. A irrigação foi realizada via gotejamento, sendo os emissores do tipo botão autocompensante (*Botão Gotejador PCJ LCNL Cilíndrico*), instalados com pressão de serviço de 2,0 bar. Os emissores foram conectados em tubos de polietileno de baixa densidade (PELBD) com 16 mm de diâmetro e microtubos do tipo *spaghetti* com diâmetro de 5mm, conectados a hastes angulares. Para fornecer diferentes disposições hídricas em estudo, a estratégia consistiu em fixar o tempo de irrigação e variar a vazão dos emissores, conforme a Tabela 3.

Tabela 3. Vazão dos emissores (L h⁻¹ vaso⁻¹) utilizados para obter as lâminas de irrigação (%).

Vazão (L h ⁻¹ vaso ⁻¹)	Lâmina de irrigação (%)
---	-------------------------

2	40
3	70
4	100
5	130

A tomada de decisão sobre o momento da irrigação foi realizada via tensiometria. Foram instalados 4 tensiômetros a 15 cm de profundidade na lâmina de 100%, utilizada como referência para irrigação. O monitoramento dos tensiômetros foi realizado diariamente, aproximadamente às 17:00 horas. A tensão crítica da lâmina de referência (100%) para os 4 tratamentos da lâmina ideal (FMA+Si+, FMA+Si-, FMA-Si- e FMA-Si+) era utilizada para determinar o volume de água a ser aplicada na irrigação, auxiliando na tomada de decisão.

O sistema de irrigação foi alimentado por um conjunto motobomba de 0,5cv de potência, cujo tempo de funcionamento foi programado por meio de um controlador digital *Rain Bird ESP-ME3* com resolução de 1 minuto. A leitura era seguida de irrigação imediata sendo feita uma vez ao dia.

Para o potencial matricial de água no solo (Figura 2) as maiores tensões foi 75% superior para 40% da irrigação (-383 mBar). Esses valores estão relacionados aplicação de água no solo durante todo o ciclo.

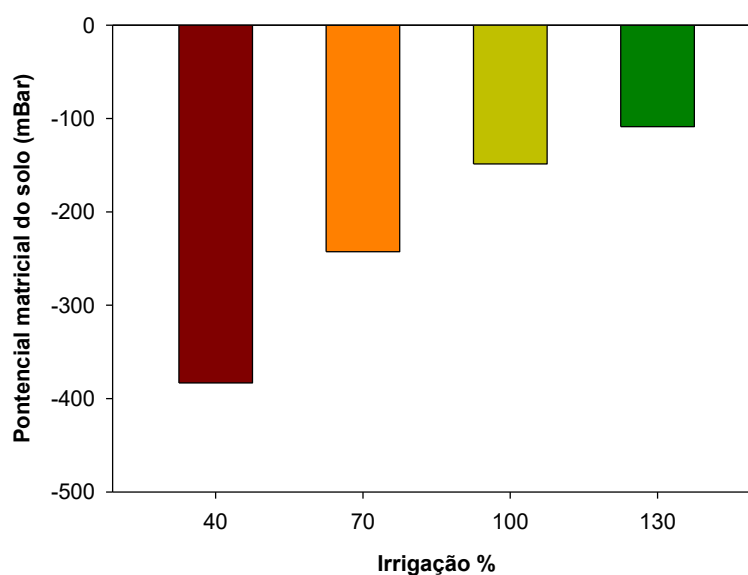


Figura 2. Potencial matricial da água do solo para lâminas de irrigação de 40%, 70%, 100% e 130% da reposição de água considerada ideal pelo tensiômetro (100%) ao longo de todo o ciclo.

Para a maior umidade do solo (Figura 3), a lâmina de 130% da irrigação recomendada foi superior em relação às lâminas de irrigação de 40%, 70%, 100% da reposição de água. Com as médias durante todo o ciclo.

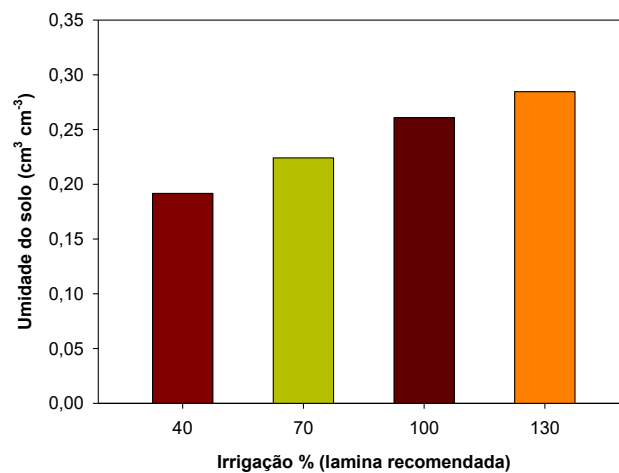


Figura 3. Umidade do solo para lâminas de irrigação de 40%, 70%, 100% e 130% da reposição de água considerada ideal pelo tensiômetro (100%).

Para o volume de água (Figura 4) o maior volume de água aplicado foi para 130% da lâmina de irrigação recomendada, sendo essa medida obtida pelo volume total aplicado segundo o tempo pela lâmina. Essa diferença é atribuída à diferenciação das lâminas de acordo com o gotejador, onde o tempo de irrigação foi o mesmo e referenciado pela tensão coletada do tratamento de referência da lâmina de 100%.

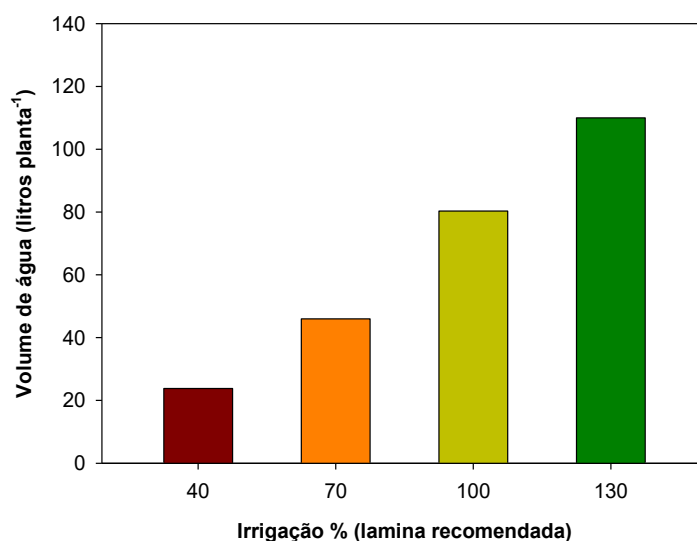


Figura 4. Volume de água aplicado no solo para lâminas de irrigação de 40%, 70%, 100% e 130% da reposição de água considerada ideal pelo tensiômetro (100%), segundo estimativas de volume do emissor pelo tempo.

4.5 Inóculo de FMA

Os fungos micorrízicos arbusculares utilizados pertencem a Coleção Internacional de Cultura de Glomeromycota (CICG) da Universidade Regional de Blumenau (FURB). Um inóculo misto, elaborado a partir da mistura de quantidades iguais dos seguintes isolados de FMAs: *Acaulosporalongula* PNB101A, *Rhizophagusclarus* SCT720A, *Gigasporaalbida* PRN200A, *Dentiscutataheterogama* MGR610A, *Rhizophagusintraradices* SCT736J, *Acaulosporamellea* SCT063B foi aplicado nos 5 cm superficiais, no centro do vaso, antes da semeadura no mesmo dia, na dose de 12 g de inóculo vaso⁻¹. A aplicação de água foi feita imediatamente após a semeadura.

4.6 Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado com 4 repetições. Os tratamentos foram arranjados em um esquema fatorial 2x2x4, envolvendo dois tipos de

correção do solo (silicato de cálcio e calcário), dois níveis de inoculação de FMA (ausência e presença) e 4 lâminas de irrigação (40, 70, 100, e 130% de reposição da tensão recomendada). As parcelas experimentais foram conduzidas com uma planta por vaso após o desbaste com 14 DAS, totalizando 64 vasos e 64 plantas no interior da casa de vegetação.

4.7 Avaliações

4.7.1 Volume de raiz

Após coletado as raízes ainda frescas de todos tratamentos após a colheita, o volume das raízes foi determinado através de uma proveta de vidro borossilicato 3.3, graduada a cada 10 ml, calibrada a 20°C, com base hexagonal de polietileno com volume igual a 1.000 mL, onde as raízes da soja foram suspensas em uma bancada por sete dias para secar ao ar, em seguida foram imersas dentro da proveta descrita preenchida com álcool absoluto 70%, determinando o volume da raiz através do deslocamento do nível do álcool.

4.7.2 Índice de área foliar

O índice de área foliar foi estimado a partir do estágio reprodutivo (R1), amostras das folhas do segundo trifólio superior foram coletadas e foi realizada a medição do comprimento e a largura delas. A análise foi feita por meio da retirada das folhas, que foram pesadas de forma individual obtendo-se o índice de área foliar específica, expressa em centímetros quadrados por grama (cm^2/g). Posteriormente, com a coleta de todas as folhas das plantas foi realizada a pesagem total da matéria seca das folhas em estufa imediatamente após a coleta para medição e o IAF foi estimado (GASSEN, 2001; TOLEDO, et al., 2010) usando a seguinte equação:

$$\text{IAF} = (\text{MSf} \times \text{AFE}) / S$$

Sendo:

IAF = Índice de área foliar

MSf = Massa seca total do tratamento, g.

AFE = Área foliar específica, cm^2/g

S = Número de plantas por vaso

4.7.3 Avaliação fisiológica

4.7.3.1 Eficiência no uso da água

As avaliações das trocas gasosas foliares foram efetuadas nas plantas em fase reprodutiva denominada R1, padronizando a folha diagnóstica (folha fisiologicamente ativa), utilizando o analisador infravermelho IRGA (modelo LC pro-SD) no período da manhã, em dias sem nuvens, entre 8 e 11 h, dessa forma foi determinado a eficiência no uso da água dividindo a taxa fotossintética líquida pela taxa transpiratória foliar no período de R1.

4.7.3.2 Produtividade da soja

No final da pesquisa foram avaliadas a produtividade da soja por planta, os resultados obtidos foram convertidos depois da correção da umidade para 14%, conforme demonstrado abaixo:

$$PF = PI * (100 - UI / 100 - UF)$$

Onde:

PF: peso final da amostra (g);

PI: peso inicial da amostra (g);

UI: umidade inicial da amostra (%);

UF: umidade final da amostra (14%).

4.8 Genótipo da cultura

O genótipo de soja utilizado foi a cultivar GMS 6834 IPRO, de nome comercial Pérola. Segundo a empresa responsável pela comercialização das sementes, este híbrido apresenta ciclo de 120 dias após a semeadura (DAS) e é caracterizado por excelente sanidade foliar, ampla adaptação geográfica e elevado potencial produtivo. Foram semeadas 4 sementes por vaso e aos 14 DAS foi realizado o desbaste, deixando somente uma planta por vaso.

4.9 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância e, em caso de interação significativa, os efeitos foram desdobrados dentro dos níveis de cada fator. As médias dos fatores Si e FMA foram comparadas pelo teste de Scott Knott. Todas as análises foram realizadas no *software RStudio*. Para todas as análises estatísticas, o nível de significância adotado foi de 5%.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a massa seca da raiz na presença dos fungos micorrizicos arbusculares (FMA) a maior produção foi para a presença do silício (Si) com aumento das lâminas de irrigação (Figura 5A). Já na ausência do FMA foram observados a mesma tendência do maior volume da raiz na presença de Si com aumento da reposição de água no solo (Figura 5B), sendo exceção nos resultados a lâmina de 40%, onde com ausência de FMA a presença de silício obteve menor volume de raiz (Figura 5B).

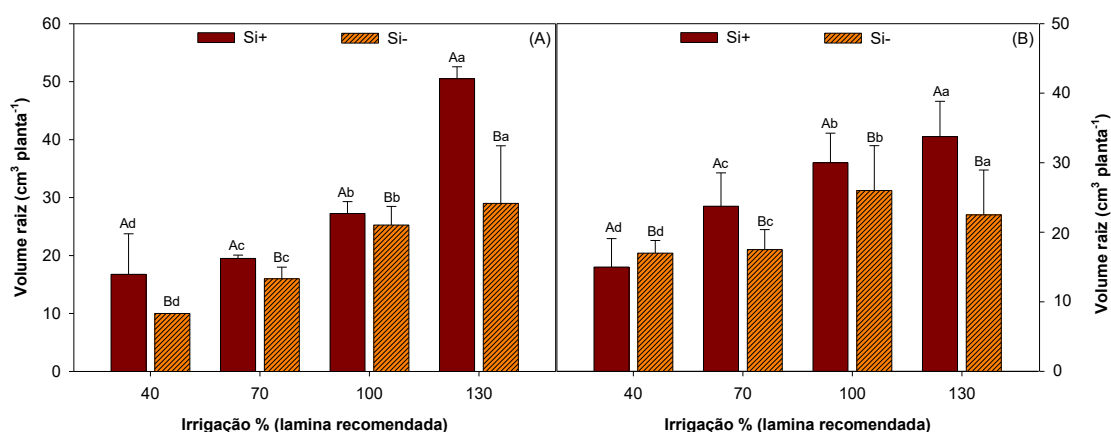


Figura 5. Volume da raiz em função na presença e ausência de Si e 40; 70; 100 e 130% da reposição de água considerada ideal pelo tensiômetro (100%) e em função da presença do FMA (Figura A) e ausência do FMA (Figura B). Colunas com letras minúsculas diferentes comparam dentro das lâminas de irrigação e letras maiúsculas nas colunas de cores iguais comparam entre a presença e ausência do Si indicando diferenças significativas em relação ao teste de Scott-Knott ($P < 0.05$). As colunas correspondem às médias de quatro repetições e desvios padrão.

Para o índice de área foliar na folha da soja observamos na presença do FMA e do Si, houve aumento em todas as lâminas, conforme a Figura 6A(Figura 6A). Para a ausência do FMA (Figura 6B) e independente do nível de reposição de água, a presença do Si proporcionou maior acúmulo foliar. Tanto na presença quanto na ausência de FMA com silício, para a lâmina de 70%, a área foliar foi predominantemente maior em relação aos demais tratamentos. Segundo Reis (2013), o aumento da área foliar permite maior captação de irradiação solar e consequentemente aumenta a produção e a disponibilidade de fotoassimilados para o crescimento e produção da planta. Segundo Silva (2015), a umidade do solo interfere diretamente nos processos fisiológicos que ocorrem no metabolismo da planta. A quantidade de água disponível no solo deve ser cada vez maior conforme a soja vai se desenvolvendo, sendo o ideal a maior disponibilidade hídrica ocorrer durante a fase de enchimento de grãos, o que representa um fator crucial para a produtividade da cultura (SERAFIM, 2012). A umidade interfere no período de germinação pois influencia diretamente no vigor das plântulas e no estande da lavoura, o que faz da umidade do solo um ponto relevante para a tomada de decisão na época de semeadura (PESKE; DELOUCHE, 1985). Segundo Heiffig (2006), o rendimento máximo da soja depende da otimização do potencial de captação de radiação solar pela planta, pois esse fator determina a quantidade de matéria seca durante o estágio reprodutivo. Dessa

forma, a maior área foliar para 70% de lâmina pode indicar uma compensação forçada pela planta para superar a limitação hídrica e ter um bom desempenho na fase reprodutiva.

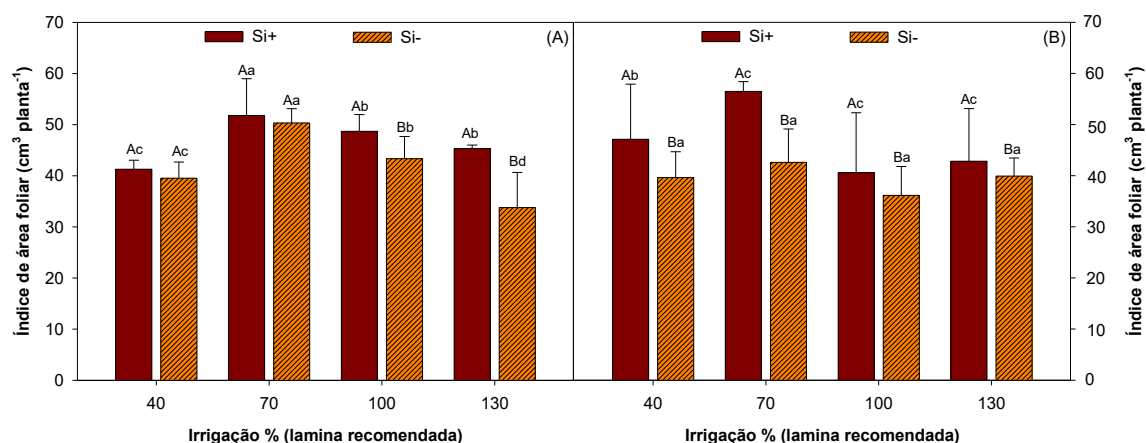


Figura 6. Volume da raiz em função na presença e ausência de Si e 40; 70; 100 e 130% da reposição de água considerada ideal pelo tensiômetro (100%) e em função da presença do FMA (Figura A) e ausência do FMA (Figura B). Colunas com letras minúsculas diferentes comparam dentro das lâminas de irrigação e letras maiúsculas nas colunas de cores iguais comparam entre a presença e ausência do Si indicando diferenças significativas em relação ao teste de Scott-Knott ($P < 05$). As colunas correspondem às médias de quatro repetições e desvios padrão.

A eficiência no uso da água na presença do FMA (Figura 7A) foi superior até 70% reposição de água na presença Si, após para 100% reposição de água ausência de Si foi superior. Para ausência do FMA (Figura 7B), a a reposição de água foi superior na presença de Si. Segundo Donato (2013), a eficiência do uso da água (EUA) representa a razão entre a quantidade de carbono assimilada na fotossíntese e a água transpirada, sendo a quantidade de carbono representada pela quantidade de matéria seca produzida pela planta. Sendo assim, esse parâmetro permite a análise da eficiência da cultura em produzir matéria seca enquanto está transpirando e realizando seus processos metabólicos. Portanto, essa eficiência reflete a necessidade de irrigação da cultura. Observando os gráficos é possível visualizar a influência do silício sobre a eficiência hídrica, pois esse mineral atua na parede celular das folhas

ocasionando maior rigidez da estrutura celular, aumentando a regulação osmótica e melhorando os índices de eficiência do uso da água (SANTOS, 2022).

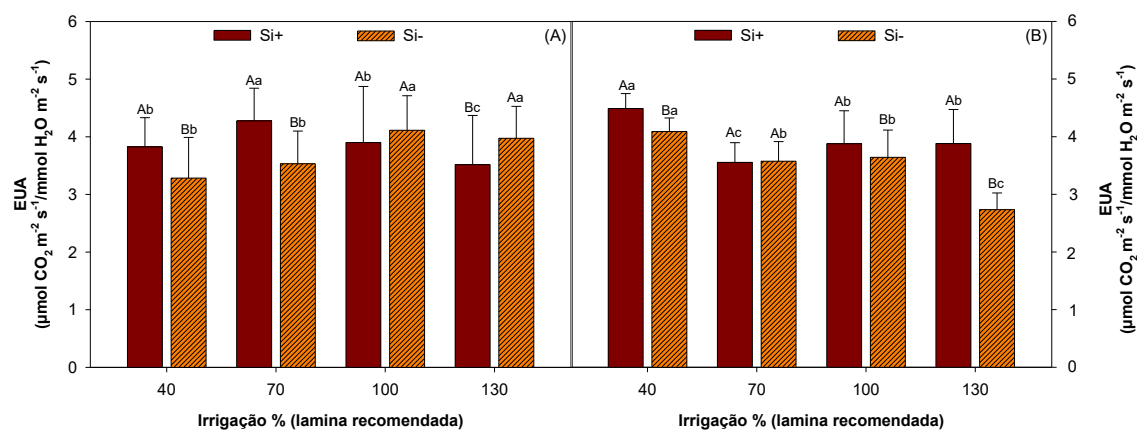


Figura 7. Volume da raiz em função na presença e ausência de Si e 40; 70; 100 e 130% da reposição de água considerada ideal pelo tensiômetro (100%) e em função da presença do FMA (Figura A) e ausência do FMA (Figura B). Colunas com letras minúsculas diferentes comparam dentro das lâminas de irrigação e letras maiúsculas nas colunas de cores iguais comparam entre a presença e ausência do Si indicando diferenças significativas em relação ao teste de Scott-Knott ($P < 0.05$). As colunas correspondem às médias de quatro repetições e desvios padrão.

Para a produtividade da soja independente da presença do FMA (Figura 8A e B) na presença do Si com aumento da irrigação a produtividade da soja aumentou. Observamos que a associação FMA e Si ajudou a amenizar o estresse de seca, sendo a produtividade sempre superior ao tratamento sem essa associação. Os fungos micorrizicos tem influência direta nesse aumento visualizado sob o tratamento ausente dos fatores, visto que os FMA aumentam a superfície de absorção da planta e consequentemente aumentando o potencial de absorção de água e nutrientes (BERRUTI, 2016). Ao longo de seu ciclo, a soja necessita entre 450 mm e 800 mm, variando de acordo com o potencial e necessidade da cultivar. Embora essa quantidade represente em totalidade uma estimativa da necessidade da cultura, a forma como é distribuída é determinante para a eficiência do uso da água, pois é durante os períodos críticos de enchimento de grãos e floradas que o volume de água deve atender de forma eficaz, embora outros índices podem interferir no aspecto produtividade, entre elas umidade relativa do ar,

temperatura e ventos (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007). O índice produtividade foi determinado de acordo com a massa de grãos produzidas por tratamento, pois esse é o critério que influencia no fator econômico e financeiro da cultura que é um dos pilares do agronegócio brasileiro no mercado de grãos (CEPEA, 2023). O monitoramento do potencial matricial é fundamental para a gestão de áreas produtivas, pois permite que sejam implementados técnicas e manejos que amenizem os efeitos do estresse de seca e possibilita a análise de eficiência dos mesmos (SILVA, 2015). Os períodos de maior tensão do solo correspondem a fase entre o florescimento e o enchimento dos grãos (SERAFIM, 2012).

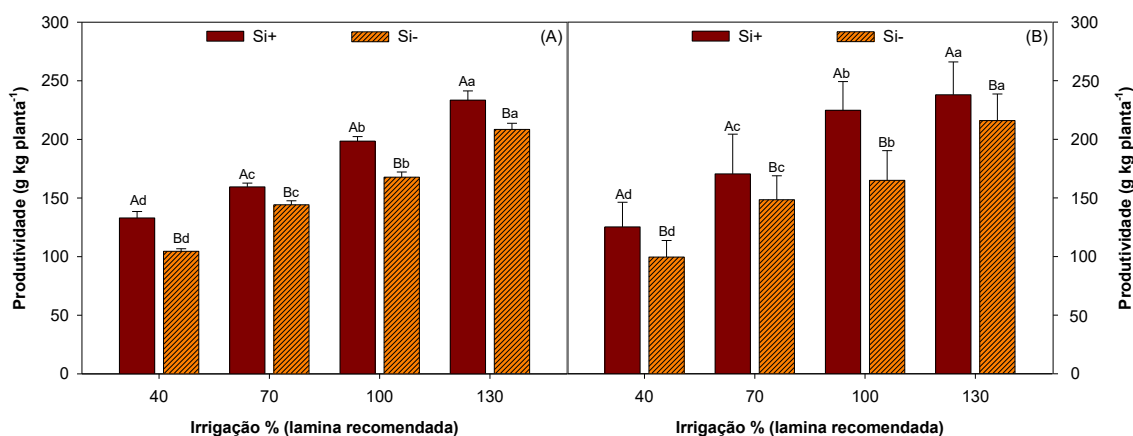


Figura 8. Volume da raiz em função na presença e ausência de Si e 40; 70; 100 e 130% da reposição de água considerada ideal pelo tensiômetro (100%) e em função da presença do FMA (Figura A) e ausência do FMA (Figura B). Colunas com letras minúsculas diferentes comparam dentro das lâminas de irrigação e letras maiúsculas nas colunas de cores iguais comparam entre a presença e ausência do Si indicando diferenças significativas em relação ao teste de Scott-Knott ($P < 05$). As colunas correspondem às médias de quatro repetições e desvios padrão.

6 CONCLUSÃO

Concluiu-se com a pesquisa que houve efeito do aumento da água na produtividade da soja independente da presença e ausência de FMA, entretanto, com a presença de silício o incremento houve maior incremento em relação a ausência.

Nas menores reposições de água de 40% houve incremento na produtividade da soja na presença da associação de Si e FMA, aumentando a eficiência no uso da água.

REFERÊNCIAS

AGOSTINETTO, D. et al. Water deficit and plant recovery affect interaction between soybean and slender amaranth. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 15, n. 4, p. 1-9, 2020.

BAKHAT, H. F. et al. O silício mitiga estresses bióticos em plantas cultivadas: uma revisão. **Proteção de Cultivos**, v. 104, pág. 21-34, 2018.

BERRUTI, A. et al. Fungos micorrízicos arbusculares como biofertilizantes naturais: vamos nos beneficiar dos sucessos do passado. **Fronteiras em microbiologia**, v. 6, p. 1559, 2016.

CARNEIRO FILHO, A.; COSTA, K.. A expansão da soja no cerrado. **Caminhos para a ocupação territorial, uso do solo e produção sustentável. São Paulo, Agroicone**, p. p1-30, 2016.

CASAGRANDE, E. C. et al. Expressão gênica diferencial durante déficit hídrico em soja. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 13, p. 168-184, 2001.

CASSEL, J. L. et al. Benefícios da aplicação de silício em plantas. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 4, n. 4, p. 6601-6615, 2021.

CEPEA, Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. Mercado De Trabalho/Cepea: Número de Pessoas Atuando no Agro Renova Recorde. Disponível em <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/releases/mercado-de-trabalho-cepea-numero-de-pessoas-atuando-no-agro-renova-recorde.aspx>. Acesso em: 21 out. 2023.

CHAVARRIA, G. et al. Restrição fotossintética de plantas de soja sob variação de disponibilidade hídrica. **Ciência Rural**, v. 45, p. 1387-1393, 2015.

CNA, Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil. Mapa da Logística da Soja e do Milho no Brasil (2020). Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/mapa-da-logistica-da-soja-e-do-milho-no-brasil-2020>. Acesso em: 21 de out. 2023.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Com novo recorde, produção de grãos na safra 2022/23 chega a 322,8 milhões de toneladas. Disponível em <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5157-com-novo-recorde-producao-de-graos-na-safra-2022-23-chega-a-322-8-milhoes-de-toneladas>. Acesso em: 17 out. 2023.

CUNHA AIRES, G. et al. Umidade do solo e estresse hídrico simulado com Hydrus-1D em área com sorgo forrageiro irrigado. **Agrometeoros**, v. 30, 2022.

DE OLIVEIRA, T. C. et al. Produtividade da soja em associação ao fungo micorrízico arbuscular *Rhizophagus clarus* cultivada em condições de campo. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 18, n. 4, p. 530-535, 2019.

DONATO, S. L. R. et al. Eficiência de uso da água em bananeiras. Disponível em: www.alice.cnptia.embrapa.br, 2013.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Importância Socioeconômica da Soja. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/soja/pre-producao/socioeconomia/importancia-socioeconomica-da-soja>. Acesso em: 17 out. 2023.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Soja em números (2022/23). Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>. Acesso em: 21 out. 2023.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. Ecofisiologia da soja. **Portal Embrapa**. 2007.

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

GAVA, R. et al. Estratégias de manejo de déficit hídrico na irrigação da cultura da soja. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 10, n. 3, p. 305-315, 2016.

GENRE, A. et al. Unique and common traits in mycorrhizal symbioses. **Nature Reviews Microbiology**, v. 11, pág. 649-660, 2020.

GRZEGOZEWSKI, D. M. et al. Correlação espacial da produtividade da soja, índice de vegetação aumentada (EVI) e variáveis agrometeorológicas. **Engenharia Agrícola**, v. 37, pág. 541-555, 2017.

- GUERRA, A. F. Manejo da irrigação sob condições de cerrado visando o potencial de produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 7, p. 1111-1118, 1994.
- HEIFFIG, L. S. et al. Fechamento e índice de área foliar da cultura da soja em diferentes arranjos espaciais. **Bragantia**, v. 65, p. 285-295, 2006.
- JÚNIOR, F. M. C. et al. Atividade micorrízica em áreas de agricultura familiar no Sul do Piauí. **Peer Review**, v. 5, n. 19, p. 101-112, 2023.
- LARA, T. S. et al. Influência da densidade de esporos de fungos micorrízicos arbusculares nativos da Savana no desenvolvimento do milho (*Zea mays*). **Revista Brasileira de Ciências da Amazônia/Brazilian Journal of Science of the Amazon**, v. 9, n. 4, p. 21-28, 2020.
- NETO, J. B. et al. Impactos da seca e das mudanças climáticas no metabolismo das plantas: Uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 8, p. e16710817060-e16710817060, 2021.
- NUNES, A. M. C. et al. Silício na tolerância ao estresse hídrico em tomateiro. **Revista Científica Rural**, v. 21, n. 2, p. 239-258, 2019.
- PARVEEN, A. et al. Silicon priming regulates morpho-physiological growth and oxidative metabolism in maize under drought stress. **Plants**, v. 8, n. 10, p. 431, 2019.
- PEREIRA JÚNIOR, P. et al. Efeito de doses de silício sobre a produtividade e características agrônômicas da soja [*Glycine max* (L.) Merrill]. **Ciência e agrotecnologia**, v. 34, p. 908-913, 2010.
- PESKE, S. T.; DELOUCHE, J. C. Semeadura de soja em condições de baixa umidade do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 20, n. 1, p. 69-85, 1985.
- QUEIROZ-VOLTAN, R. B.; NOGUEIRA, S. S. S.; MIRANDA, M. A. C. De. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 929-938, 2000.
- REIS, L. S. et al. Índice de área foliar e produtividade do tomate sob condições de ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 386-391, 2013.
- REIS MOREIRA, A. et al. Resposta da cultura de soja a aplicação de silício foliar. **Bioscience Journal**, v. 26, n. 3, p. 413-423, 2010.
- SANTOS, C. C. et al. The role of silicon in the mitigation of water stress in *Eugenia myrcianthes*

Nied. seedlings. **Brazilian Journal of Biology**, v. 82, 2022.

SILVA, J. R. L. et al. Modelagem da dinâmica de umidade do solo em diferentes condições de cobertura no semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 10, n. 2, p. 293-303, 2015.

SOUZA, G. M. et al. Soja sob déficit hídrico: respostas fisiológicas e de produtividade. **Uma Pesquisa Abrangente da Pesquisa Internacional da Soja - Genética, Fisiologia, Agronomia e Relações com Nitrogênio**, p. 273-298, 2013.

SOUZA, J. P. F. et al. Efeito de silicato de cálcio e magnésio no crescimento inicial de milho transgênico. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 2, n. 3, p. 13-17, 2015.

VAN RAIJ, B. van et al. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. **Boletim técnico**, v. 100, n. 2, 1997.