

CARLA SABRINA DA SILVA

**RESPOSTAS ECOFISIOLÓGICAS DO MILHO SUBMETIDO AO ESTRESSE
HÍDRICO E À APLICAÇÃO DE SILÍCIO NO SEMIÁRIDO**

RECIFE-PE

FEVEREIRO DE 2024

CARLA SABRINA DA SILVA

**RESPOSTAS ECOFISIOLÓGICAS DO MILHO SUBMETIDO AO ESTRESSE
HÍDRICO E À APLICAÇÃO DE SILÍCIO NO SEMIÁRIDO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola (Área de Concentração: Engenharia de Água e Solo).

Orientador: Prof. Dr. Gerônimo Ferreira da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Samuel Silva

RECIFE-PE

FEVEREIRO DE 2024

S586r

da Silva, Carla Sabrina

RESPOSTAS ECOFISIOLÓGICAS DO MILHO SUBMETIDO AO ESTRESSE HÍDRICO E À APLICAÇÃO DE
SILÍCIO NO SEMIÁRIDO / Carla Sabrina da Silva. - 2024.
121 f. : il.

Orientador: Geronimo Ferreira da Silva.

Coorientador: Samuel Silva.

Inclui referências.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola, Recife, 2024.

1. Zea mays. 2. déficit hídrico. 3. silicato. 4. crescimento. 5. nutrição mineral. I. Silva, Geronimo Ferreira da, orient.
II. Silva, Samuel, coorient. III. Título

À minha família, minha base e meu porto.

Aos meus avós, Manoel e Aurora (in memoriam), meus maiores e melhores orientadores da vida.

À minha mãe Maria do Socorro, e ao meu pai José Carlos, pelo apoio incondicional em todos os momentos difíceis da minha trajetória acadêmica.

Aos meus irmãos, Eduardo, Henrique, Daniel, Gabriele, Grazielle e Daniele, por trazerem toda leveza e alegria aos meus dias mais conturbados.

DEDICO!

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela força, sabedoria e discernimento para passar pelos desafios que me trouxeram até aqui.

À minha família, pelo apoio e incentivo de sempre, esse título também é de vocês.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco, pela oportunidade, apoio institucional e infraestrutura oferecida.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade. Aos professores que contribuíram nessa etapa da minha formação acadêmica.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas, pelo apoio institucional e infraestrutura oferecida para a realização deste trabalho, muito obrigada por fazer parte de mais essa etapa da minha vida acadêmica.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES.

Ao meu orientador Dr. Gerônimo Ferreira por todo apoio, conselhos, direcionamentos, paciência e aprendizados, além da confiança depositada. Máximo respeito e admiração por sua trajetória profissional.

Ao meu coorientador, Dr. Samuel Silva, que desde a minha graduação vem me ensinando a ser uma pesquisadora. Obrigada pelo incentivo, apoio, pela confiança e paciência. Todo meu respeito e admiração pela sua pessoa profissional. Gratidão!

Aos graduandos em Engenharia Agrônômica do IFAL/Piranhas, pela ajuda na condução do experimento em campo, em especial aos colegas Francisco, Aracelle, Evaldo, Alexandre, Gyovanni, Luiz, Mateus e João.

Aos colegas e amigos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, que de alguma forma contribuíram para minha formação enquanto profissional.

Aos meus amigos Edmaíris, Suéllen, Lara, Willyane, Daniele, Fernanda, Rosana, Évillyn e Ivan, que permaneceram torcendo por mim, mesmo de longe, minha gratidão pela torcida e momentos de alegrias.

MUITO OBRIGADA!

“Conheça todas as teorias, domine todas as técnicas, mas ao tocar
uma alma humana seja apenas outra alma humana.”

Carl Jung

RESUMO GERAL

A cultura do milho é uma das mais utilizadas pelos agricultores do semiárido alagoano. No entanto, devido às irregularidades de chuvas na região, a cultura fica submetida a períodos de déficit hídrico, o que compromete a produtividade da cultura. Efeitos positivos do uso do silício (Si) como mitigador de estresses ambientais têm sido mostrados em muitos resultados experimentais. Assim, objetivou-se com este estudo avaliar o efeito da aplicação de silício sobre os aspectos de crescimento, fisiológicos, nutricionais e de produção da cultura do milho submetida a diferentes períodos de déficit hídrico no Semiárido. O experimento foi executado no IFAL-Campus Piranhas. A cultura foi submetida a uma combinação de cinco condições de estresse hídrico (1, 4, 7, 10 e 13 dias de turno de rega - TR) e duas condições de disponibilidade de Si (com e sem Si). O delineamento experimental foi em faixas, esquematizado em parcelas subdivididas. Foram avaliadas as seguintes variáveis: altura do dossel, diâmetro do colmo, índice de área foliar (IAF), acúmulo de massa fresca e seca de plantas. Foram determinados o acúmulo e a exportação dos nutrientes N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Mn, Zn e Si. Foram mensuradas as taxas fisiológicas com um analisador de trocas gasosas (IRGA). Por ocasião da colheita, foram medidos o rendimento de milho verde e índices de produtividade de grãos secos. O aumento nos níveis de déficit hídrico causa redução no crescimento e produtividade de milho verde e de grãos. Os índices fisiológicos, a extração e exportação de nutrientes reduziram com o aumento dos TR. A aplicação de Si aumenta o IAF, o peso de espigas, o percentual de espigas comerciais e a produtividade de grãos. As plantas tratadas com Si extraem e exportam mais nutrientes. Devido às variações nas respostas das plantas, maiores estudos com uso de Si como atenuante de estresse hídrico devem ser realizados.

Palavras-chave: *Zea Mays* L., déficit hídrico, silicato, crescimento, trocas gasosas, nutrição mineral.

GENERAL ABSTRACT

The corn crop is one of the most used by farmers in the semi-arid region of Alagoas. However, due to rainfall irregularities in the region, the crop is subjected to periods of water deficit, which compromises the productivity of the crop. Positive effects of the use of silicon (Si) as a mitigator of environmental stresses have been shown in many experimental results. Thus, the objective of this study was to evaluate the effect of the application of silicon on the growth, physiological, nutritional and production aspects of the corn crop subjected to different periods of water deficit in the Semi-arid region. The experiment was performed at the IFAL-Campus Piranhas. The culture was subjected to a combination of five water stress conditions (1, 4, 7, 10 and 13 days of irrigation intervals) and two conditions of availability of Si (with and without Si). The experimental design was in strips, schematized in subdivided plots. The following variables were evaluated: canopy height, stem diameter, leaf area index (LAI), accumulation of fresh and dry mass of plants. The accumulation and export of nutrients N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Mn, Zn and Si were determined. Physiological rates were measured with a gas exchange analyzer (IRGA). At the time of harvest, the yield of green corn and productivity indices of dry grains were measured. The increase in water deficit levels causes a reduction in the growth and productivity of green corn and grains. The physiological indices, the extraction and export of nutrients have reduced with the increase in irrigation intervals. The application of Si increases the LAI, the weight of ears, the percentage of commercial ears and grain productivity. Plants treated with Si extract and export more nutrients. Due to variations in plant responses, larger studies with the use of Si as a water stress mitigator should be carried out.

Keywords: *Zea Mays* L., water deficit, silicate, growth, gas exchanges, mineral nutrition.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO GERAL, OBJETIVOS, HIPÓTESES, REVISÃO DE LITERATURA E MATERIAL E MÉTODOS	20
1. INTRODUÇÃO GERAL	20
2. OBJETIVOS	21
2.1. GERAL.....	21
2.2. ESPECÍFICOS	22
3. HIPÓTESES	22
4. REVISÃO DE LITERATURA	22
4.1. Importância socioeconômica e aspectos gerais da cultura do milho	22
4.2. Cultivo do milho no semiárido e necessidade de irrigação.....	25
4.3. Efeito do déficit hídrico nas plantas de milho.....	26
4.4. Funções do silício nas plantas.....	27
4.5. Silício como atenuador de estresses bióticos e abióticos	29
5. MATERIAL E MÉTODOS GERAL	30
5.1. Localização e caracterização do ambiente da pesquisa	30
5.2. Delineamento experimental e tratamentos	33
5.3. Plantio e manejo da cultura do milho.....	33
6. REFERÊNCIAS	39
CAPÍTULO II – INFLUÊNCIA DA APLICAÇÃO DE SILÍCIO NO CRESCIMENTO E ECOFISIOLOGIA DO MILHO SOB CONDIÇÕES DE ESTRESSE HÍDRICO	49
1. INTRODUÇÃO	51
2. MATERIAL E MÉTODOS	52
2.1. Fluxo de água no solo	52
2.2. Análises biométricas e fenológicas da cultura	53
2.3. Trocas gasosas foliares.....	53
2.4. Determinação da fitomassa fresca e seca das plantas	54
2.5. Análises estatísticas	54
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
3.1. Fluxo de água no solo	55
3.2. Crescimento e fenologia da cultura	57
3.3. Trocas gasosas do milho	66
3.4. Fitomassa fresca e seca do milho	69
4. CONCLUSÕES.....	74

5. REFERÊNCIAS	75
CAPÍTULO III - EFEITO DA APLICAÇÃO FOLIAR DE SILÍCIO SOBRE A EXTRAÇÃO E A EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES PELO DO MILHO SOB ESTRESSE HÍDRICO	80
1. INTRODUÇÃO	82
2. MATERIAL E MÉTODOS	83
2.1. Determinação da matéria seca	83
2.2. Extração e exportação de nutrientes	83
1.1. Análises estatísticas	84
2. RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
2.1. Extração de nutrientes	85
2.2. Exportação de nutrientes.....	90
1.1. Matéria seca total e matéria seca da espiga de milho	95
2. CONCLUSÕES.....	97
3. REFERÊNCIAS	98
CAPÍTULO IV - EFEITO DA APLICAÇÃO DE SILÍCIO SOBRE VARIÁVEIS DE PRODUÇÃO DO MILHO SUBMETIDO AO ESTRESSE HÍDRICO NO SEMIÁRIDO.....	104
1. INTRODUÇÃO	106
2. MATERIAL E MÉTODOS	107
2.1. Rendimento de espigas verdes.....	107
2.2. Rendimento de grãos e componentes de produção	107
2.3. Análises estatísticas	108
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	108
3.1. Rendimento e características das espigas de milho verde	108
3.2. Rendimento e características das espigas de milho seco.....	112
4. CONCLUSÕES.....	118
5. REFERÊNCIAS	119
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	123

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO GERAL, OBJETIVOS, HIPÓTESES, REVISÃO DE LITERATURA E MATERIAL E MÉTODOS

Figura 1. Subdivisões dos estádios de desenvolvimento da cultura do milho (Fonte: Pionner Sementes). 24

Figura 2. Localização da área experimental no IFAL/Piranhas no município de Piranhas-AL (Fonte: Google Earth adaptado pela autora). 31

Figura 3. Precipitação pluvial diária, evapotranspiração de referência e temperatura média do ar medidos durante o ciclo do milho cultivado entre fevereiro e junho de 2023 na região do semiárido alagoano. 32

Figura 4. Croqui do experimento com detalhes das dimensões. 33

Figura 5. Preparo do solo com gradagem aradora (A), abertura dos sulcos de plantio (B), adubação de fundação (C) e montagem do sistema de irrigação (D). 34

Figura 6. Sistema de fertirrigação por bomba injetora (A) e cabeçal de controle da irrigação para os diferentes tratamentos de turno de rega (B). 37

Figura 7. Estação automática de aquisição de dados meteorológicos localizada no IFAL/Piranhas. 38

CAPÍTULO II – INFLUÊNCIA DA APLICAÇÃO DE SILÍCIO NO CRESCIMENTO E ECOFISIOLOGIA DO MILHO SOB CONDIÇÕES DE ESTRESSE HÍDRICO 49

Figura 1. Armazenamento de água no solo para os tratamentos 1 dia de TR (A), 4 dias de TR (B), 7 dias de TR (C), 10 dias de TR (D) e 13 dias de TR (E) ao longo dos dias após o plantio do milho cultivado em Piranhas, AL (SS – sem silício; CS – com silício; CAD — capacidade de água disponível; UC – umidade crítica). 56

Figura 2. Efeito da interação dos fatores estresse hídrico (turnos de rega - TR) e aplicação de silício sobre a altura do dossel (A) e efeito isolado destes fatores sobre o diâmetro do colmo (B) e o índice de área foliar – IAF (C) na cultura do milho cultivado no semiárido Alagoano. 60

Figura 3. Efeito da interação da idade das plantas (dias após o plantio) e níveis de estresse hídrico sobre a altura do dossel na cultura do milho cultivado no semiárido Alagoano (os níveis de estresse hídrico E1, E2, E3, E4 e E5 correspondem aos TR de 1, 4, 7, 10 e 13 dias, respectivamente). 63

Figura 4. Efeito da interação da idade das plantas (dias após o plantio) e níveis de estresse hídrico sobre o diâmetro do colmo na cultura do milho cultivado no semiárido Alagoano (os níveis de estresse hídrico E1, E2, E3, E4 e E5 correspondem aos TR de 1, 4, 7, 10 e 13 dias, respectivamente).	64
Figura 5. Efeito da interação da idade das plantas (dias após o plantio) e níveis de estresse hídrico sobre o índice de área foliar (IAF) na cultura do milho cultivado no semiárido Alagoano (os níveis de estresse hídrico E1, E2, E3, E4 e E5 correspondem aos TR de 1, 4, 7, 10 e 13 dias, respectivamente).	65
Figura 6. A - fotossíntese líquida (A), E - transpiração (B), gs - condutância estomática (C), Ci – concentração interna de CO ₂ (D), A/E - eficiência instantânea de uso da água (E) e A/g _s - eficiência intrínseca do uso da água (F) avaliadas na cultura do milho submetido ao estresse hídrico (turno de rega - TR) em função de turnos de rega no semiárido Alagoano, aos 43 dias após o planto.	67
Figura 7. Desdobramento da interação entre os fatores estresse hídrico (turnos de rega - TR) e aplicação de silício (com e sem Si) sobre a matéria fresca e seca da parte aérea (A e C, respectivamente) e a matéria fresca e seca da espiga (B e D, nesta ordem) na cultura do milho cultivado no semiárido Alagoano.	70
Figura 8. Desdobramento da interação dos fatores aplicação de Si e idade das plantas (dias após o plantio - DAP) sobre a matéria fresca da parte aérea (A), efeito isolado da idade das plantas sobre a matéria fresca e seca da espiga (B e D) e efeito isolado dos fatores aplicação de Si e idade das plantas sobre a matéria seca da parte aérea (C) na cultura do milho cultivado no semiárido Alagoano.	72
Figura 9. Desdobramento da interação entre os fatores idade da planta (DAP) e estresse hídrico (turnos de rega - TR) sobre a matéria fresca da espiga na cultura do milho cultivado no semiárido Alagoano (os níveis de estresse hídrico E1, E2, E3, E4 e E5 correspondem aos TR de 1, 4, 7, 10 e 13 dias, respectivamente).	73
CAPÍTULO III - EFEITO DA APLICAÇÃO FOLIAR DE SILÍCIO SOBRE A EXTRAÇÃO E A EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES PELO DO MILHO SOB ESTRESSE HÍDRICO	80
Figura 1. Efeito isolado dos fatores estresse hídrico (turnos de rega - TR) e aplicação de silício (com e sem Si) sobre a extração total (parte aérea e espiga) dos macronutrientes nitrogênio (A), cálcio (B) e potássio (C) pela cultura do milho cultivado no semiárido Alagoano.	86

Figura 2. Efeito da interação dos turnos de rega (TR) e aplicação de silício sobre a extração total (parte aérea e espiga) do micronutrientes Ferro (A), e efeito isolado dos turnos de rega e da aplicação de Si sobre a extração total dos micronutrientes Manganês (B) e Zinco (C), e efeito isolado dos turnos de rega sobre a extração do elemento Si (D) pela cultura do milho cultivado no semiárido Alagoano 88

Figura 3. Efeito da interação dos fatores estresse hídrico (turno de rega - TR) e aplicação de Si (com e sem Si) sobre a exportação de Fósforo (A) e Magnésio (B), e efeito isolado desses fatores sobre a exportação dos nutrientes Cálcio (C) e Ferro (D) pelas espigas de milho cultivado no semiárido Alagoano 92

Figura 4. Efeito dos turnos de rega sobre a matéria seca total das plantas de milho cultivadas no semiárido Alagoano. 96

CAPÍTULO IV - EFEITO DA APLICAÇÃO DE SILÍCIO SOBRE VARIÁVEIS DE PRODUÇÃO DO MILHO SUBMETIDO AO ESTRESSE HÍDRICO NO SEMIÁRIDO..... 104

Figura 1. Desdobramento da interação dos fatores estresse hídrico (turnos de rega - TR) e aplicação de silício (com e sem Si) sobre o número de espigas por hectare (A), a produtividade de espiga empalhada e despalhada (B e C, nesta ordem) e produtividade de espiga empalhada comercializável (D) na cultura do milho verde cultivado no semiárido Alagoano.....110

Figura 2. Efeito do estresse hídrico (turnos de rega - TR) sobre comprimento de espiga (A), diâmetro de espiga (B) e número de grãos por fileira (C) na cultura do milho em fase de grão seco cultivado no semiárido Alagoano.114

Figura 3. Efeito dos fatores estresse hídrico (turnos de rega - TR) e aplicação de silício sobre o número de espigas por hectare e produtividade de grãos (A e C, nesta ordem) e efeito isolado do estresse hídrico sobre a massa seca de mil grãos (B) no milho em fase de grão seco cultivado no semiárido Alagoano.116

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO GERAL, OBJETIVOS, HIPÓTESES, REVISÃO DE LITERATURA E MATERIAL E MÉTODOS

Tabela 1. Análise química do solo da área experimental. 35

Tabela 2. Atributos de caracterização física do solo da área experimental..... 36

CAPÍTULO II – INFLUÊNCIA DA APLICAÇÃO DE SILÍCIO NO CRESCIMENTO E ECOFISIOLOGIA DO MILHO SOB CONDIÇÕES DE ESTRESSE HÍDRICO 49

Tabela 1. Graus-dia acumulados e fenologia da cultura do milho cultivado em Piranhas-AL entre os meses de fevereiro e junho de 2023..... 58

Tabela 2. Resumo da análise de variância para as variáveis de altura do dossel (AD), diâmetro do colmo (DC) e índice de área foliar (IAF) em função dos fatores estresse hídrico (turnos de rega - TR), silício (com e sem aplicação) e idade (dias após o plantio) na cultura do milho cultivado no semiárido Alagoano..... 59

Tabela 3. Resumo da análise de variância para as variáveis fisiológicas: fotossíntese líquida (A), transpiração (E), condutância estomática (gs), concentração interna de CO₂, eficiência instantânea de uso da água (A/E) e eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s), avaliadas na cultura do milho submetido ao estresse hídrico (turnos de rega - TR) e à aplicação de silício no semiárido Alagoano, aos 43 dias após o planto. 66

Tabela 4. Resumo da análise de variância para as variáveis: matéria fresca e seca da parte aérea (MFPA e MSPA, respectivamente) e matéria fresca e seca da espiga (MFE e MSE, respectivamente) em função dos fatores estresse hídrico (turnos de rega - TR), silício (com e sem aplicação) e idade (dias após o plantio) na cultura do milho cultivado no semiárido Alagoano..... 69

CAPÍTULO III - EFEITO DA APLICAÇÃO FOLIAR DE SILÍCIO SOBRE A EXTRAÇÃO E A EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES PELO DO MILHO SOB ESTRESSE HÍDRICO 80

Tabela 1. Resumo da Análise de Variância para extração (parte aérea e espigas) de macronutrientes, micronutrientes e Si em função dos fatores estresse hídrico (E) (turnos de rega - TR) e silício (S) (com e sem aplicação) na parte aérea e na espiga da cultura do milho cultivado no semiárido Alagoano..... 85

Tabela 2. Efeito da aplicação de Si sobre a extração total (parte aérea e espiga) dos macronutrientes fósforo e enxofre pela cultura do milho cultivado no semiárido Alagoano. 90

Tabela 3. Resumo da Análise de Variância para exportação de macronutrientes, micronutrientes e Si em função dos fatores estresse hídrico (turnos de rega - TR) e silício (com e sem aplicação) pelas espigas de milho cultivado no semiárido Alagoano. 91

Tabela 4. Efeito da aplicação de Si sobre a exportação dos nutrientes fósforo, enxofre e zinco e do elemento silício pela espiga do milho cultivado no semiárido Alagoano. 94

Tabela 5. Resumo da Análise de Variância para exportação de macronutrientes, micronutrientes e o elemento Si em função dos fatores estresse hídrico (turnos de rega - TR) e silício (com e sem aplicação) no milho cultivado no semiárido alagoano. 96

CAPÍTULO IV - EFEITO DA APLICAÇÃO DE SILÍCIO SOBRE VARIÁVEIS DE PRODUÇÃO DO MILHO SUBMETIDO AO ESTRESSE HÍDRICO NO SEMIÁRIDO..... 104

Tabela 1. Resumo da Análise de Variância para as variáveis de número de espigas por hectare (NEV), produtividade de espigas empalhadas e despalhadas, e produtividade de espigas empalhadas e despalhadas comercializáveis (EC) avaliadas na cultura do milho na fase de milho verde tratado com déficit hídrico (turnos de rega - TR) e aplicação de silício no semiárido Alagoano. 109

Tabela 2. Resumo da Análise de Variância para variáveis de comprimento de espiga (CE), diâmetro de espiga (DE), número de fileiras (NF) e número de grãos por fileira (NG) avaliadas no milho na fase de grão seco tratado com déficit hídrico (turnos de rega - TR) e aplicação de silício no semiárido Alagoano.113

Tabela 3. Resumo da análise de variância para variáveis de número de espigas (NE), massa fresca de mil grãos (MFG), massa seca de mil grãos (MSG) e produtividade de grãos (PROD) avaliadas na cultura do milho na fase de grão seco sob déficit hídrico (turnos de rega - TR) e aplicação de silício no semiárido Alagoano.....115

-----CAPÍTULO I-----

**INTRODUÇÃO GERAL, OBJETIVOS, HIPÓTESES, REVISÃO DE
LITERATURA E MATERIAL E MÉTODOS**

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO GERAL, OBJETIVOS, HIPÓTESES, REVISÃO DE LITERATURA E MATERIAL E MÉTODOS

1. INTRODUÇÃO GERAL

O milho (*Zea Mays* L.) é o cereal mais importante em termos de produção global e o segundo mais relevante em termos de área plantada. O elevado potencial produtivo, composição química e valor nutritivo fazem com que esse cereal seja considerado mundialmente como um dos mais importantes. O Brasil ocupa o terceiro lugar no ranking dos maiores produtores mundiais da cultura, onde é cultivada em todas as regiões conforme as condições climáticas (Coêlho, 2021), entretanto, em algumas delas constata-se produções abaixo da média nacional (Conab, 2023).

O estado de Alagoas tem a maior parte de seu território inserida na porção semiárida do Nordeste, uma região caracterizada por secas recorrentes (Rocha Júnior et al, 2020), onde verificam-se baixas produtividades da cultura do milho (Conab, 2023) em decorrência da baixa disponibilidade hídrica e das irregularidades dos eventos pluviométricos (Silva et al., 2021). O estresse hídrico é uma restrição ambiental severa à produtividade agrícola, atuando como fator determinante no cultivo das mais variadas espécies de interesse econômico (Henrique et al, 2021).

A deficiência de água é um dos principais propulsores de estresse nas culturas agrícolas e responsável por distúrbios de crescimento (Taiz et al, 2017). De acordo com Silva et al. (2021), a ocorrência de estresse hídrico a partir da fase de pendoamento do milho provoca a não formação de espiga pela planta e quando o déficit de água ocorre a partir da fase de polinização, o milho produz espigas mal formadas e apresenta baixo rendimento, além de redução na área foliar e matéria seca. Desta forma, o uso de técnicas que visam diminuir os efeitos de estresses abióticos nas plantas são alternativas viáveis para o incremento no sistema de produção (Fatima et al., 2019), uma vez que a redução na disponibilidade hídrica no solo prejudica o metabolismo dos vegetais.

O uso de silício (Si) em plantas cultivadas sob déficit hídrico é promissor, considerando os efeitos benéficos em plantas em condições físico-químicas desfavoráveis do solo, com o aumento da resistência física do tecido vegetal e da produção metabólica. A importância do Si para as plantas está diretamente relacionada às interações planta-ambiente, pois confere melhores condições para tolerarem as adversidades do meio,

gerando resultados significativos na produtividade e melhoria na qualidade do produto (Zuffo e Aguilera, 2020).

Conforme Cassol et al. (2021), o Si é um elemento que pode proporcionar melhor crescimento e desenvolvimento às plantas cultivadas em ambientes com deficiência hídrica, por ser um estimulador enzimático, promovendo sinalização para produção de compostos antioxidantes. O fornecimento de Si permite amenizar a condição de estresse e melhorar o desempenho da cultura, aumentando o rendimento e a qualidade pós-colheita em condições de déficit hídrico (Wenneck et al., 2021).

Plantas acumuladoras de Si, como as gramíneas, sofrem menos com os efeitos do estresse hídrico, uma vez que as folhas se tornam mais eretas proporcionando melhores condições para as trocas gasosas, e consequentemente, para a fotossíntese, promovendo aumento da biomassa. A aplicação de Si melhora a eficiência nutricional, aumentando a concentração de P, K, Ca, Mg e S (Castro et al., 2023) e é uma prática promissora para o metabolismo fotossintético (Santos et al., 2023). Sousa Junior et al. (2022) constataram que a aplicação de silício proporcionou aumento na altura e diâmetro do colmo da cana-de-açúcar e Amin et al. (2023) observaram aumento no crescimento e na produção de sorgo, ambas as culturas são acumuladoras de Si, assim como o milho.

O milho é uma espécie relativamente tolerante ao déficit hídrico. Contudo, a redução na disponibilidade de água no solo afeta sua produtividade. Considerando a importância socioeconômica dessa cultura para a população da região Nordeste do Brasil, onde é frequente a limitação hídrica pela ocorrência de veranicos, torna-se necessário estudar alternativas que potencializem a produtividade desta cultura. Nesse contexto, a aplicação de silício pode atenuar os danos causados pela restrição hídrica na planta e garantir o aumento da produtividade.

2. OBJETIVOS

2.1. GERAL

Avaliar o efeito da aplicação de silício sobre o crescimento, a produção, aspectos fisiológicos e nutricionais da cultura do milho submetido a diferentes períodos de déficit hídrico no Semiárido.

2.2. ESPECÍFICOS

Determinar o crescimento das plantas submetidas ao déficit hídrico em função aplicação da adubação silicatada;

Quantificar os acúmulos dos nutrientes minerais nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) da cultura em função dos tratamentos avaliados;

Avaliar o consumo hídrico diário e total da cultura ao longo de todo o ciclo de cultivo;

Analisar o efeito da aplicação da adubação silicatada sobre as relações hídricas e as trocas gasosas do milho submetido ao déficit hídrico.

Quantificar a produção de milho verde e de grãos das plantas submetidas ao déficit hídrico em função da aplicação de silício.

3. HIPÓTESES

O silício atenua o efeito do estresse hídrico sobre a cultura do milho e promove maiores índices de crescimento e de produtividade em relação às plantas não adubadas com o elemento.

A aplicação de silício proporciona uma maior eficiência de extração, um maior acúmulo e uma nutrição mineral mais equilibrada de nutrientes pela cultura do milho sob estresse hídrico em relação às plantas não adubadas com o elemento.

Os melhores resultados para as relações hídricas e para as variáveis fisiológicas são obtidos com a aplicação de silício em comparação com as plantas não adubadas com o elemento.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1. Importância socioeconômica e aspectos gerais da cultura do milho

O milho (*Zea mays* L.) originário da América Central já era consumido pelos indígenas antes da chegada dos colonizadores no Brasil, daí em diante o consumo do cereal cresceu notadamente. Depois de muitos anos de seleção e modificação genética, obteve-se o milho que conhecemos hoje. Além do grande valor econômico atual, o milho é um dos cereais mais relevantes no planeta com uma produção de, aproximadamente, 1 bilhão de toneladas métricas (García-Lara e Serna-Saldivar, 2019).

Atualmente é o cereal produzido em maior escala no país, com cerca de 131.865,9 milhões de toneladas de grãos produzidos, em uma área de aproximadamente 22.267,4 milhões de hectares, sendo a região Centro-oeste a maior produtora do Brasil com 58,5% da produção de grãos, seguido das regiões Sul e Sudeste com 18,8 e 9,6%, respectivamente (Conab, 2023). O Brasil está entre os quatro maiores produtores mundiais de milho, que juntos são responsáveis por 72,3% da produção global (Contini et al., 2019). Os Estados brasileiros que estão à frente dessa produção são Mato Grosso (33.243,9 t), Paraná (9.614,2 t), Goiás (8.431,0 t), Mato Grosso do Sul (6.429,0 t), Minas Gerais (6.085,8 t), Rio Grande do Sul (4.390,1 t) e São Paulo (3.279,8 t), nesta ordem respectivamente (Conab, 2023).

No Brasil, o milho tem sido cultivado em diferentes condições de ambiente, desde regiões frias até em regiões quentes, com baixas altitudes e latitudes, gerando diferentes potenciais de produtividade (Artuzo et al., 2019). A cultura tem grande importância econômica, devido às diversas formas de sua utilização, desde a alimentação humana e animal até a indústria de alta tecnologia e utilização na produção de biocombustíveis (Fornasier-Filho, 2007).

Dentro da classificação botânica, o milho pertence à ordem Gramineae, família Poaceae, sub-família Panicoideae, tribu Maydeae, gênero *Zea*, espécie *Zea mays*. O gênero *Zea* é considerado monotípico e constituído por uma única espécie (Campos e Canéchio Filho, 1973). O milho faz parte do grupo de plantas com metabolismo fotossintético classificado como C4, caracterizado por um mecanismo de concentração de CO₂ no sítio ativo da Ribulose-bifosfato-carboxilase-oxigenase (Rubisco) do ciclo de Calvin e Benson, que mantém alta razão CO₂/O₂ e elimina a fotorrespiração (Eicholz et al., 2020; Ehleringer; Cerling; Helliker, 1997).

O sistema de identificação das fases fenológicas do milho divide o desenvolvimento da planta em vegetativo (V) e reprodutivo (R), de acordo com a Figura 1. Os estádios vegetativo e reprodutivo podem ser subdivididos em: (VE) emergência, (V1) 1ª folha desenvolvida, (V2) 2ª folha desenvolvida, (V3) 3ª folha desenvolvida, (V4) 4ª folha desenvolvida, (Vn) nª folhas desenvolvidas, (VT) pendoamento, (R1) embonecamento e polinização, (R2) – grão bolha d'água, (R3) – grão leitoso, R4 – grão pastoso, R5 – formação de dente, R6 – maturidade fisiológica (Magalhães e Durães, 2006).

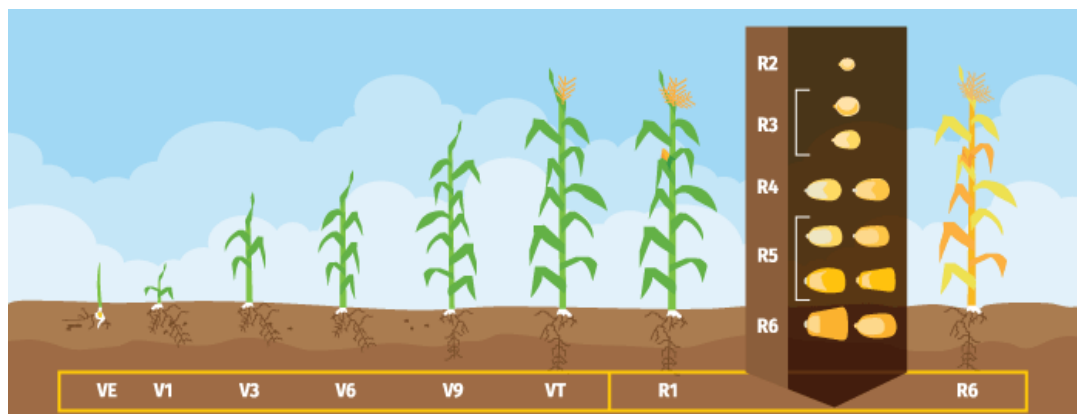


Figura 1. Subdivisões dos estádios de desenvolvimento da cultura do milho (Fonte: Pionner Sementes).

O clima é considerado o principal fator limitante para um bom crescimento e desenvolvimento das culturas. Variáveis como precipitação, temperatura e radiação solar são essenciais no período de crescimento e desenvolvimento do milho. Vários trabalhos relatam que o milho é uma das culturas básicas mais vulneráveis às intempéries e pode ser muito afetada por possíveis mudanças climáticas (Tao et al., 2004, 2008).

O crescimento máximo da cultura ocorre entre 26°C e 34°C, sendo os limites extremos 8°C e 44°C (Bergamaschi e Matzenauer, 2014). A temperatura para a fase da germinação até a fase de maturação deve estar em torno de 25°C. Temperaturas abaixo de 15°C podem provocar retardamento do processo de maturação dos grãos (Embrapa, 2010). Em relação às temperaturas noturnas, quando estas são superiores a 24°C ocorre o aumento da taxa respiratória, ocasionando a redução da taxa de fotoassimilados, resultando em queda na produção (Sans e Santana, 2007).

As plantas de milho respondem de maneira positiva à radiação solar, por apresentarem o metabolismo fotossintético C4. A radiação solar é muito importante para essas culturas, sem a qual o processo fotossintético é inibido e a planta fica bloqueada de manifestar seu máximo potencial produtivo. Cerca de 90% da matéria seca dessas culturas resulta da fixação de CO₂ no processo de fotossíntese, os outros 10% são originados da absorção de nutrientes (Magalhães e Souza, 2011).

A evapotranspiração é considerada uma das variáveis mais afetadas por mudanças nas condições do ambiente. Alguns estudos na cultura do milho (Islam et al., 2012; Tao e

Zhang, 2011) apontam uma redução na necessidade de irrigação em virtude da redução do ciclo vegetativo das culturas provocado pelo aumento nas temperaturas da superfície.

A cultura do milho apresenta períodos diferentes de intensa absorção de nutrientes. O primeiro ocorre durante a fase de desenvolvimento vegetativo, V12 a V18 folhas, quando o número potencial de grãos está sendo definido. O segundo período compreende a fase reprodutiva ou formação da espiga, quando o potencial produtivo é atingido. Os nutrientes têm diferentes taxas de translocação entre os tecidos na planta de milho. No que se refere à exportação dos nutrientes, o fósforo é quase todo translocado para os grãos (77 a 86 %), seguindo-se o nitrogênio (70 a 77 %), o enxofre (60 %), o magnésio (47 a 69 %), o potássio (26 a 43 %) e o cálcio (3 a 7 %) (Coelho, 2006).

O milho apresenta alta sensibilidade à deficiência de zinco, média à de cobre, ferro e manganês e baixa à de boro e molibdênio. Apesar do baixo requerimento, a deficiência de um micronutriente pode resultar na desorganização de processos metabólicos e redução da produtividade da cultura, tal como ocorre sob deficiência de um qualquer macronutriente primário (Barros e Calado, 2014).

4.2. Cultivo do milho no semiárido e necessidade de irrigação

O crescimento da população mundial está chegando a um ponto em que a água de boa qualidade está se tornando insuficiente para as necessidades básicas da humanidade, incluindo a irrigação de terras agrícolas, uso urbano e nas indústrias (Ashraf et al., 2017). Além disso, a diferença entre a oferta e a demanda de água está aumentando devido à distribuição desigual dos recursos hídricos e ao rápido desenvolvimento socioeconômico, particularmente em regiões áridas e semiáridas do mundo (Ashraf et al., 2015).

A cultura do milho assume papel de destaque na economia da região semiárida por ocupar um lugar representativo na geração da renda agrícola e por sua importância na alimentação humana e animal (Santos et al., 2010). Contudo, os sistemas de produção da região semiárida brasileira são definidos pela baixa produtividade do milho, provocada principalmente, pela instabilidade das chuvas, altas temperaturas da superfície e o baixo nível de tecnologia adotado pelos produtores (Carvalho et al., 2007).

As regiões de clima semiárido são caracterizadas pela ocorrência de altas temperaturas, altas taxas de evapotranspiração, irregularidade de precipitação pluvial e longos períodos

de estiagem (Brito, 2017; Santos et al., 2017a). Por conta destes fatores restritivos, a implantação da cultura do milho neste tipo de clima só foi possível graças à criação de estratégias para o sucesso e estabelecimento da lavoura e, conseqüentemente, o aumento da produtividade (Viçosi et al., 2017), como é o caso dos programas de melhoramento, os sistemas de irrigação e a criação de novos programas governamentais voltadas ao semiárido (Silva et al., 2016; Castro, 2018).

Desta maneira, o sucesso no cultivo depende da regularidade e precipitações das chuvas, já que nestas regiões o cultivo do milho é, em grande parte, em regime de sequeiro. No contexto de agricultura de sequeiro, Azevedo e Silva (2007) destacam que a estação de crescimento das culturas depende da época em que as chuvas efetivamente começam.

A cultura do milho apresenta alta demanda por água, mas também é uma das mais eficientes no seu uso, isto é, produz uma grande quantidade de matéria seca por unidade de água absorvida (Cavalcante Junior et al., 2018). A ocorrência de estresse hídrico causa muitos danos na cultura do milho, como a redução da produtividade, altura das plantas e diâmetro dos colmos, além da redução na fotossíntese causada pelo decréscimo na expansão celular e pelos danos causados no aparato fotossintético (Guimarães, Rocha e Paterniani, 2019). O período de máxima exigência é a fase do embonecamento ou um pouco depois, sendo nesta fase que a cultura apresenta maior sensibilidade à deficiência de água no solo, que causam maiores reduções de produtividade (Albuquerque e Resende, 2002).

4.3. Efeito do déficit hídrico nas plantas de milho

As plantas experimentam um conjunto de situações desfavoráveis ou estresse ambiental, causado por eventos físico-químicos e/ou biológicos, sendo o déficit hídrico uma das formas do estresse físico-químico (Laynez-Garsaball, et al., 2007). Na cultura do milho, um dos fatores que mais interferem na produção é a falta de água (Carmo et al., 2021). As perdas agrícolas causadas pelo estresse hídrico são maiores do que as produzidas por outros tipos de estresse, como o frio, calor, irradiação de luz excessiva ou insuficiente ou estresse químico (Laynez-Garsaball, et al., 2007).

A diminuição de água disponível no solo é chamada de déficit hídrico, que pode ocorrer em consequência da falta de água ou do potencial matricial do solo e levar a

efeitos negativos, cuja reversibilidade vai depender do genótipo, da duração, da severidade e do estágio de desenvolvimento da planta. Com a falta de água, existe conflito entre a conservação da água pela planta e a taxa de assimilação de CO₂ para produção de carboidratos, uma vez que ao abrir os estômatos para a assimilação do gás carbônico aumenta a taxa de transpiração (Taiz et al., 2017).

A cultura do milho é particularmente sensível ao estresse hídrico, uma vez que esse fator causa redução da atividade fotossintética por meio da redução de assimilação de CO₂ (Rahman et al., 2004). Dentre os efeitos ocasionados pelo déficit hídrico na célula vegetal está a desidratação da mesma, seguido por redução do potencial hídrico e da resistência hidráulica nos vasos do xilema. Os efeitos secundários resultam em prejuízos na expansão foliar, atividades celulares e metabólicas; fechamento estomático; inibição fotossintética; abscisão foliar, cessando o crescimento da planta (Taiz et al. 2017).

O estresse hídrico leva a um acúmulo de ácido abscísico (ABA) que é produzido nas raízes e nas folhas sendo transportado para as células guarda dos estômatos causando o fechamento estomático, reduzindo-se assim as trocas gasosas (transpiração) e inibindo a fotossíntese (Nabors, 2012; Taiz et al., 2017). Os efeitos causados pelo estresse hídrico ocasionam mudanças na anatomia, fisiologia e bioquímica das plantas, com grau e intensidade, dependendo do tipo de planta e do período de duração as quais foram submetidas ao estresse (Araújo et al., 2010), afetando assim todos os seus estágios de desenvolvimento, partindo da germinação até a reprodução.

Durante o período vegetativo, o déficit hídrico reduz o crescimento do milho, em função de decréscimos da área foliar e da biomassa. Porém, nesse período não estão sendo formados os componentes do rendimento. Assim, os efeitos sobre a produção de grãos são atenuados posteriormente, se as condições hídricas se tornarem favoráveis, o que poderá garantir níveis satisfatórios de rendimento de grãos (Bergamaschi e Matzenauer, 2004).

4.4. Funções do silício nas plantas

Alguns elementos não são classificados como essenciais, por não atenderem aos critérios de essencialidade, mas atuam melhorando certas respostas das plantas, como por exemplo, o crescimento e desenvolvimento, melhoria do desempenho frente aos estresses

bióticos e abióticos e auxílio no uso de outros nutrientes, sendo estes denominados elementos benéficos (Temiz, 2017). Pode-se destacar dentre estes o sódio (Na), cobalto (Co), o silício (Si) (Korndörfer e Souza, 2018) e o selênio (Se) (Dechen e Nachtigall, 2007).

O silício é o segundo elemento mais abundante que constitui 32% (em peso) da crosta terrestre (Neeru et al., 2019). A presença onipresente de Si na biosfera torna difícil provar sua essencialidade como um nutriente para plantas superiores. No entanto, várias disfunções no crescimento e desenvolvimento das plantas podem ser causadas pela deficiência de Si (Chakma et al., 2021), que juntamente com inúmeras evidências, provam os efeitos benéficos nas plantas, especialmente sob condições de estresse abiótico (Araujo et al., 2022; Dhiman et al., 2021).

As plantas absorvem silício na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4) ou seus ânions, juntamente com a água (fluxo de massa) e se acumula principalmente nas áreas de máxima transpiração (tricomas, espinhos, etc.), como ácido silícico polimerizado (sílica amorfa) (Ma, 2004), a sua distribuição ocorre via xilema e é dependente das taxas de transpiração dos órgãos. Esta distribuição varia de acordo com a espécie estudada, ocorre de maneira uniforme em plantas que acumulam pouco Si, e nas acumuladoras, como o arroz (*Oryza sativa*), 90% do elemento encontra-se na parte aérea (Menegale, Castro e Mancuso, 2015).

Na literatura científica, vários símbolos foram usados para denotar diferentes formas e compostos de Si, o que muitas vezes é confuso. ‘Si’ é usado para silício e como um termo comum quando a forma química do elemento não está sendo especificada. ‘ H_4SiO_4 ’ é usado para silício dissolvido/ácido silícico/ácido monossilícico, que é encontrado em solução de solo e absorvido por plantas e animais. ‘ SiO_2 ’ é usado para sílica, que geralmente ocorre de forma hidratada ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). A sílica é um produto polimerizado do ácido silícico, que se deposita em corpos discretos formando fitólitos nas plantas (Shivaraj et al., 2022).

Dentre os efeitos benéficos desse elemento, está a manutenção da taxa fotossintética, aumento da resistência mecânica das células, maior resistência das plantas às doenças e pragas, diminuição do efeito tóxico de Mn, Fe e outros metais pesados, e aumento da absorção e metabolismo de elementos. Além de estar associado ao aumento da capacidade

de defesa antioxidante diante de deficiência hídrica (Gong et al., 2005). A adubação com silício melhora a nutrição mineral e a eficiência de uso de macro e micronutrientes (Sousa Junior et al., 2022) e aumenta a condutância estomática (Curvêlo et al., 2013).

Fatima et al. (2019) estudando aplicação de doses de silício em plantas de alface sob níveis de estresse hídrico (50 e 100% da Evapotranspiração Real – Etr) observaram que doses maiores que 110 mg L^{-1} de Si aumentam a eficiência fotossintética por proporcionar maior lignificação dos tecidos foliares, tornando as folhas mais eretas melhorando a abertura estomática. Além disso, constataram que as doses crescentes de Si promovem redução na transpiração das folhas, e a condutância estomática (gs) é maior sob condição de estresse (50% da Etr) com efeito linear crescente, mostrando a influência do Si já que a limitação da gs corresponde ao principal efeito do déficit hídrico na planta.

Jesus et al. (2018) observaram que os maiores valores de condutância estomática ocorreram em plantas irrigadas com 100% Etr, mas não houve efeito do aumento em doses de Si. No entanto, quando as plantas estavam sob limitação hídrica, recebendo apenas 50% de Etr, a dose estimada de Si de 110 mg dm^{-3} levou à redução do efeito da limitação hídrica na condutância estomática.

4.5. Silício como atenuador de estresses bióticos e abióticos

Pesquisas vêm sendo desenvolvidas buscando avaliar a existência de relação entre doses de silício com déficit hídrico. A capacidade do Si em reduzir os efeitos do estresse hídrico é atribuída à deposição do mesmo na parede celular de raízes, folhas e caules, de forma a aumentar a resistência e rigidez das paredes celulares (Crusciol et al., 2009).

O papel benéfico do Si contra vários estresses abióticos, como déficit de água (Gong et al., 2005; Hattori et al., 2005; Shen et al., 2010; Maghsoudi et al., 2015, 2018, 2019; Ullah et al., 2018; Sirisuntornlak et al., 2019; Alam et al., 2020), salinidade (Ashraf et al., 2009), radiação (Shen et al., 2010), congelamento (Liang et al., 2008), e toxicidade por metais pesados (Feng et al., 2010), tem sido bem documentado.

Em geral, espécies da família Poaceae acumulam muito mais Si de que outras espécies (Gong et al. 2008). Diferentes mecanismos para o alívio do estresse mediado pelo silício foram propostos (Shen et al. 2010). Ming et al. (2012) sugerem que as culturas de cereais

fornecidas com Si podem sustentar um maior potencial de água foliar (ψ_w) de que culturas cultivadas sem aplicação de Si sob condições de déficit de água.

Quando o silício é depositado na folha, o mesmo forma uma dupla camada na parede celular da epiderme, a qual protege a planta contra o ataque de pragas e doenças, além de contribuir com a redução da evapotranspiração da cultura (Raven, 2003). O Si acumulado junto aos estômatos reduz a taxa de transpiração, diminuindo, dessa forma, o consumo de água pela planta (Marschner, 1995). Essa propriedade é de relevância, principalmente para o nordeste brasileiro, em que a baixa precipitação pluviométrica associada com irregularidade das chuvas no decorrer dos anos tem contribuído para que ocorra uma redução significativa da produção agrícola.

Plantas tratadas com Si foram observadas para manter maior condutância estomática e taxa de transpiração, conteúdo relativo de água na folha e condutância hidráulica de raiz e planta inteira (Liu et al., 2015). A aplicação de Si é atribuída à um melhor vigor de plântulas juntamente com um aumento no comprimento das plântulas e aumento na massa fresca em relação ao tratamento controle (Neeru et al., 2019). A fertilização à base de silício (Si) tem sido recomendada como solução para minimização dos efeitos fitotóxicos do dietholate associados ao estresse por frio (Cassol et al., 2020).

Portanto, apesar de não ser um nutriente essencial para as plantas, o silício é considerado um elemento benéfico, estando os seus principais benefícios relacionados com a redução da evapotranspiração, assim também como redução dos fatores bióticos como o ataque de pragas e doenças (Ma e Yamaji, 2006).

5. MATERIAL E MÉTODOS GERAL

5.1. Localização e caracterização do ambiente da pesquisa

A pesquisa foi conduzida na área experimental do Instituto Federal de Alagoas – Campus Piranhas (Figura 2). A classificação climática da região de acordo com Köppen é do tipo BSh, clima muito quente, semiárido, tipo estepe, com estação chuvosa centrada nos meses de março a julho. A precipitação pluvial média anual da região é de 492 mm (Santos et al., 2017b).

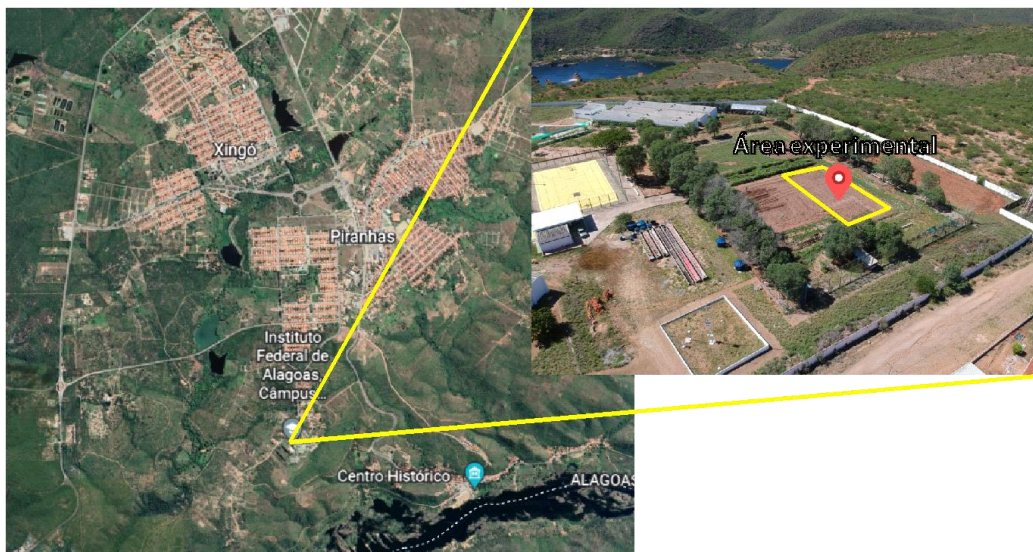


Figura 2. Localização da área experimental no IFAL/Piranhas no município de Piranhas-AL (Fonte: Google Earth adaptado pela autora).

A demanda hídrica atmosférica, representada pela Eto, variou de 0,3 a 6,7 mm dia⁻¹, com média de 4,5 mm dia⁻¹ (Figura 3). Foram observados 70 dias com Eto acima da média. Os menores valores de Eto ocorreram nos dias de chuva, devido à maior nebulosidade e diminuição da temperatura do ar. A precipitação pluvial somou 169,5 mm durante o ciclo de cultivo do milho. O maior volume de chuva ocorreu aos 117 dias após o plantio (DAP), sendo de 28,8 mm (Figura 3). Entretanto, é possível observar irregularidade na distribuição das chuvas, evidenciando a necessidade de irrigação.

A temperatura média do ar variou de 23,3 °C (105 DAP) a 30,5 °C (72 DAP) com média de 27,5 °C (Figura 3). Observa-se diminuição na temperatura do ar nos dias em que houve precipitação, quando a atmosfera esteve mais fria. A variação na temperatura do ar esteve dentro da faixa ideal para a cultura do milho, que é de 24 a 30 °C (Cruz et al., 2008).

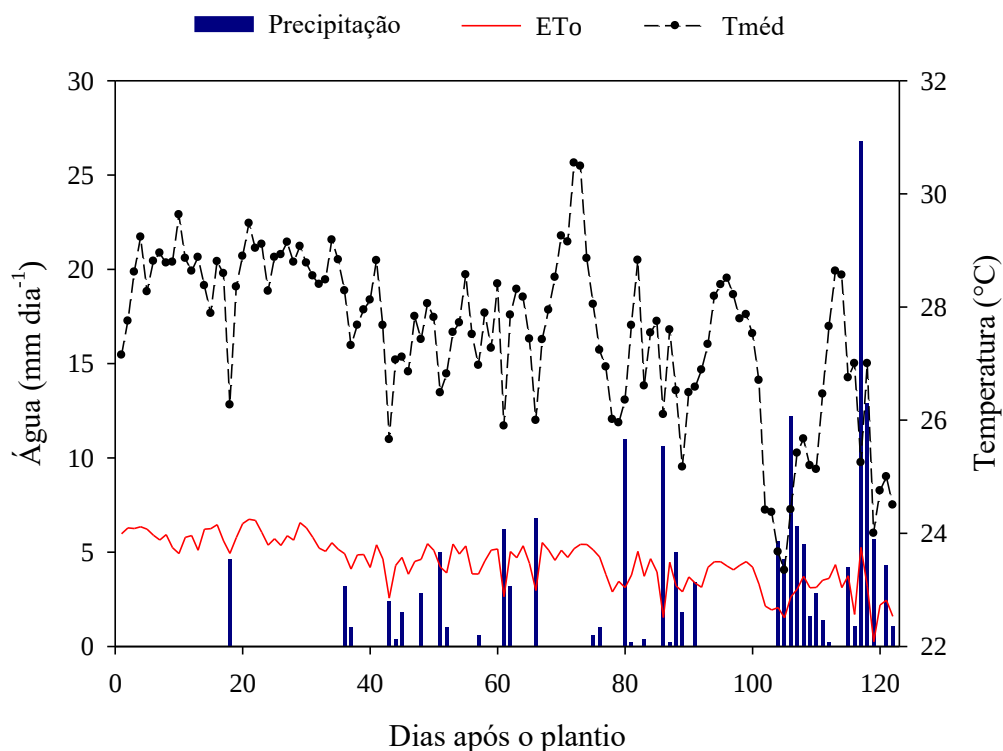


Figura 3. Precipitação pluvial diária, evapotranspiração de referência e temperatura média do ar medidos durante o ciclo do milho cultivado entre fevereiro e junho de 2023 na região do semiárido alagoano.

Foram coletadas amostras de solo nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm para determinação das características físicas e químicas do solo da área experimental. A densidade e a granulometria do solo foram determinados no Laboratório de Manejo do Solo do IFAL/Campus Piranhas. As amostras para determinação da umidade na capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP) foram coletadas em trado para amostras indeformadas. As umidades foram determinadas em cinco pontos de tensão pelo método da câmara de Richards no Laboratório de Dinâmica de Água e Solo do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco/Campus Recife. A análise de macro, micronutrientes e do Si, além de outros parâmetros químicos do solo foram realizadas em laboratório comercial.

5.2. Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi em faixas com quatro repetições, esquematizado em parcelas subdivididas. As parcelas foram tratadas com cinco turnos de rega (TR de 1, 4, 7, 10 e 13 dias) e as subparcelas tratadas com e sem aplicação de silicato de potássio solúvel em água (7,3% de Si e 17% de K₂O e densidade de 1,41 g cm⁻³). As subparcelas em cada bloco foram compostas por cinco fileiras de 6,0 m de comprimento espaçadas a 0,70 m, sendo que a área útil foi composta pelos 3,0 m centrais das três linhas do meio (Figura 4).

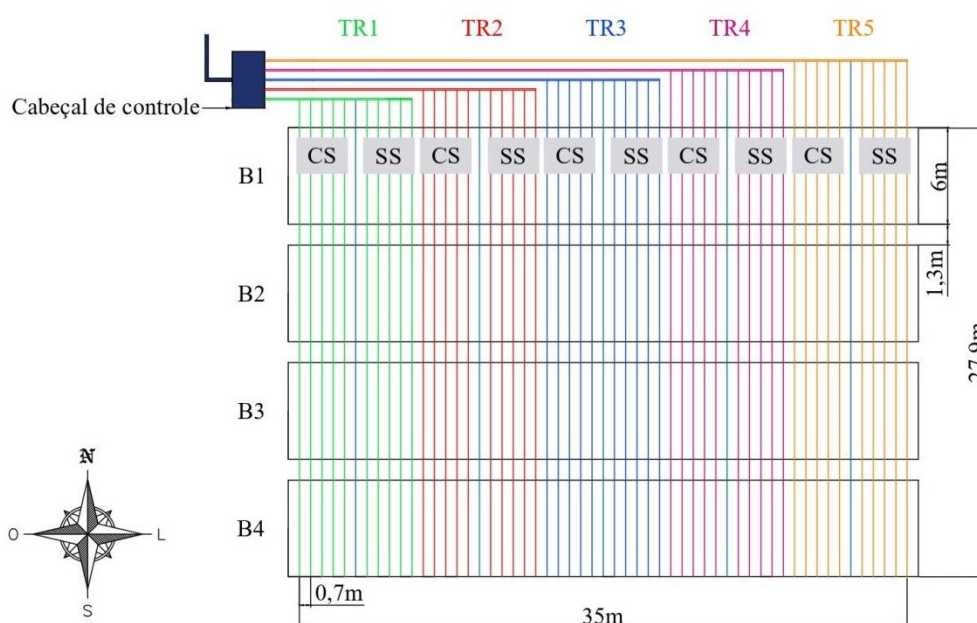


Figura 4. Croqui do experimento com detalhes das dimensões.

As variáveis de crescimento e fitomassa foram medidas quinzenalmente a partir dos 30 dias após o plantio (DAP), sendo medidas repetidas no tempo. Assim, para estas variáveis, os DAP foram considerados como fator de idade das plantas com oito níveis, sendo eles: 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120 e 135 DAP.

5.3. Plantio e manejo da cultura do milho

O preparo do solo foi realizado com gradagem aradora (Figura 5A). O plantio foi realizado em sulcos abertos manualmente, em que foram colocadas 2 sementes a cada 0,3 m e 0,7 m de espaçamento entre as linhas de plantio. Foram utilizadas as sementes de

milho híbrido Feroz Viptera 3, com alto potencial produtivo e resistência a lagarta-do-cartucho e glifosato.



Figura 5. Preparo do solo com gradagem aradora (A), abertura dos sulcos de plantio (B), adubação de plantio (C) e montagem do sistema de irrigação (D).

No fundo do sulco de plantio foi aplicada a adubação de plantio mediante as recomendações de Cavalcanti et al. (2008) e Coelho (2006) considerando um nível de produtividade de grãos de 10 t ha^{-1} e as características químicas do solo (Tabela 1), em que foi aplicado a metade do potássio na forma de cloreto de potássio (KCl), além do fósforo na forma de fosfato monoamônico (MAP) composto por 48% de P_2O_5 e 11% de nitrogênio.

Tabela 1. Atributos de caracterização química do solo da área experimental.

Prof.	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SB	Al ³⁺	H+Al	CTC	V
cm	-----cmolc dm ⁻³ -----								
0 – 20	14,02	2,39	0,60	0,084	17,09	0,00	0,39	17,48	97,78
20 – 40	7,27	1,63	0,23	0,056	9,19	0,00	0,17	9,36	98,15
Prof.	P-Mehlich	Si	M.O	CE	Fe ²⁺	Mn ²⁺	Cu ²⁺	Zn ²⁺	
cm	-----mg dm ⁻³ -----		g kg ⁻¹	dS m ⁻¹	-----mg dm ⁻³ -----				
0 – 20	201,1	9,27	9,1	0,82	70,4	78,4	0,8	9,1	
20 – 40	127,0	9,78	4,6	0,51	68,5	39,4	0,4	33,2	

SB = Soma de bases; H+Al = Acidez potencial; CTC = Capacidade de troca de cátions; V = Saturação por bases; MO = matéria orgânica; CE = condutividade elétrica.

A adubação de cobertura foi realizada via fertirrigação aos 15 DAP, tendo-se aplicado os outros 50% do potássio recomendado. A adubação nitrogenada foi parcelada aos 15, 20 e 25 DAP. Foram realizadas três aplicações da adubação silicatada via foliar, a primeira e a segunda aplicação na dose de 0,5 L ha⁻¹, nas fases V4 e V6 da cultura, tendo-se utilizado como fonte o silicato de potássio. A terceira aplicação foi realizada na fase de pendoamento da cultura (VT), em que foi aplicada a dose de 1 L ha⁻¹, conforme recomendação do fabricante.

O desbaste foi realizado na fase 1 com auxílio de tesouras de poda, quando as plantas estavam com as quatro folhas definitivas, deixando um estande de 47.619 plantas ha⁻¹. O controle de plantas espontâneas foi feito com aplicação de herbicida pós-emergência (ingrediente ativo glifosato) na dose de 5 L ha⁻¹ e capina manual, de acordo com a necessidade. O controle de pragas e doenças foi realizado por meio do manejo integrado de pragas (MIP) e doenças (MID) conforme recomendações da Embrapa Milho e Sorgo (Casela et al., 2006; Valicente, 2015).

A irrigação foi realizada com fitas gotejadoras de 16 mm de diâmetro e espessura de 8 Mil, com vazão de 1,6 L h⁻¹, pressão nominal de 10 mca e espaçamento entre gotejadores de 0,2 m (Figura 5D). Nos primeiros vinte dias todos os tratamentos foram irrigados diariamente de forma a manter a umidade próximo a Capacidade de Campo (CC), a partir deste período (21 DAP), foram aplicados os tratamentos com os turnos de rega. O manejo da irrigação foi realizado pelo monitoramento da umidade do solo através de tensiômetros instalados em cada subparcela nas profundidades de 20 e 40 cm,

respeitando-se o limite de armazenamento de água no solo, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Atributos de caracterização física do solo da área experimental.

Prof.	Ds	CC	PMP	CAD	UC	Granulometria
cm	g cm ⁻³	-----cm ³ cm ⁻³ -----		-----mm-----		-
0 – 20	1,66	0,208	0,143	12,84	9,84	Franco Arenoso
20 – 40	1,62	0,168	0,095	14,65	10,72	Areia Franca

Ds = Densidade do solo; CC = Capacidade de campo; PMP = Ponto de murcha permanente; CAD = Capacidade de água disponível e UC = Mínimo de água armazenada no solo.

A umidade do solo foi determinada em função da equação da curva de retenção de água no solo para as profundidades de 0 – 20 cm (Equação 1) e 20 – 40 cm (Equação 2), utilizando-se as medidas de tensão de água no solo.

$$\theta = 2,47x^{-0,07} \quad (1)$$

$$\theta = 2,212x^{-0,1} \quad (2)$$

A água utilizada na irrigação foi procedente da Companhia de Saneamento de Alagoas – Casal, e armazenada em um reservatório com capacidade para 5.000 L, do qual foi bombeada para a área de cultivo através de um sistema de automação para o controle de aplicação da irrigação em cada nível de estresse. No cabeçal de controle do sistema de irrigação foi instalada uma motobomba de 0,5 CV, uma eletroválvula e um controlador para operação automática do sistema, manômetro para aferição da pressão inicial nas linhas laterais, regulador de pressão e um filtro de disco, em que sua limpeza era realizada diariamente para garantir a manutenção da pressão de serviço dos emissores. A fertirrigação foi realizada por bomba injetora, em que para dissolução dos fertilizantes foi utilizada uma caixa de 500 L e acoplada à caixa foi instalada uma motobomba de 1 CV para injeção de fertilizantes via água de irrigação utilizando-se mangueira cristal trançada flexível de 25 mm (Figura 6A). Para o controle da irrigação e fertirrigação de cada tratamento de estresse hídrico, foram instalados registros de PVC no início das linhas de derivação correspondentes aos tratamentos (Figura 6B).



Figura 6. Sistema de fertirrigação por bomba injetora (A) e cabeçal de controle da irrigação para os diferentes tratamentos de turno de rega (B).

Foram coletados dados agrometeorológicos numa estação automática de aquisição de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada no IFAL-Piranhas próximo à área experimental (Figura 7). Os dados de precipitação pluvial, temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar foram obtidos para aferição da evapotranspiração de referência (E_{to}) que foi calculada pelo método de Penman-Monteith, conforme a Equação 3:

$$E_{to} = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \left(\gamma \frac{900}{T + 273} \right) u_2 (e_s - e)}{\Delta + [\gamma (1 + 0,34 u_2)]} \quad (3)$$

Em que: Δ é a inclinação da curva da pressão de vapor d'água saturado versus temperatura do ar ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); R_n é o Saldo de radiação estimado ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); γ é o Coeficiente psicrométrico; T é a temperatura média do ar; u_2 é a velocidade média do vento a 2 m de altura (m s^{-1}); e_s é a pressão de saturação do vapor d'água do ar (kPa); e é a pressão do vapor d'água do ar (kPa).



Figura 7. Estação automática de aquisição de dados meteorológicos localizada no IFAL/Piranhas.

6. REFERÊNCIAS

- ALAM, A.; HARIYANTO, B.; ULLAH, H.; SALIN, K. R.; DATTA, A. Effects of silicon on growth, yield and fruit quality of cantaloupe under drought stress. **Silicon**, v. 13, p. 3153–3162, 2020. [https:// doi.org/10.1007/s12633-020-00673-1](https://doi.org/10.1007/s12633-020-00673-1).
- ALBUQUERQUE, P. E. P.; RESENDE, M. Cultivo do milho: manejo de irrigação. **Embrapa Milho e Sorgo** (Comunicado Técnico, 47), 8p., 2002.
- AMIN, M.; MULYAWAN, R.; SANTARI, P. T.; MANWAN, S. W.; PRASETYO, R. A. Pemupukan Silikon dalam Meningkatkan Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Sorgum. **Vegetalika**, v. 12, n. 4, p. 325-341, 2023. DOI: <https://doi.org/10.22146/veg.84207>
- ARAÚJO, S. A. C., VASQUEZ H. M., CAMPOSTRINI E., NETTO A. T., DEMINICIS B. B. & LIMA É. S. Características fotossintéticas de genótipos de capim-elefante anão (*Pennisetum purpureum* Schum.), em estresse hídrico. **Acta Scientiarum: Animal Sciences**, v. 32, n. 1, p. 1-7, 2010.
- ARAUJO, W. B. S.; TEIXEIRA, G. C. M.; PRADO, R. M.; ROCHA, A. M. S. Silicon mitigates nutritional stress of nitrogen, phosphorus, and calcium deficiency in two forages plants. **Nature**, v. 12, n. 6611, p. 1-11, 2022.
- ARTUZO, F. D.; FOGUESATTO, C. R.; MACHADO, J. A. D.; OLIVEIRA, L.; SOUZA, A. R. L. O potencial produtivo brasileiro: uma análise histórica da produção de milho. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 12, n. 2, p. 515-540, 2019. DOI: 10.17765/2176-9168.2019v12n2p515-540
- ASHRAF, M.; RAHMATULLAH, AHMAD, R.; AFZAL, M.; TAHIR, M. A.; KANWAL, S.; MAQSOOD, M. A. Potassium and silicon improve yield and juice quality in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) under salt stress. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 195, n. 4, p. 284–291, 2009.
- ASHRAF, M.; SHAHZAD, S. M.; AKHTAR, N.; IMTIAZ, M.; ALI, A. Salinization/sodification of soil and physiological dynamics of sunflower irrigated with saline-sodic water amending by potassium and farm yard manure. **Journal of Water Reuse and Desalination**, v. 7, n. 4, p. 476-487, 2017. <https://doi.org/10.2166/wrd.2016.053>
- ASHRAF, M.; SHAHZAD, S. M.; SIDDIQUI, A. R.; PIRACHA, M. A. Management of brackish water for irrigating sunflower (*Helianthus annuus* L.) through integrated use of potassium and farm yard manure. In: International Training Workshop on Sustainable Agriculture Water Management in a Changing Environment: A Special Focus on Olive

- Tree, Rawalpindi, 2015. Proceedings... Rawalpindi: PMAS-Arid Agriculture University, p.111-117, 2015.
- AZEVEDO, P.V.; SILVA, F.D.S. Risco climático para o cultivo do algodoeiro na região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 2, p. 408-416, 2007.
- BARROS, J. F. C.; CALADO, J. G. **A cultura do milho**. Évora: Universidade de Évora – Departamento de Fitotecnia, 2014. 52 p.
- BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. O milho e o clima. Emater/RS-Ascar, p. 84, 2014.
- BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; BERGONCI, J. I.; BIANCHI, C. A. M.; MÜLLER, A. G.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 39, n. 9, p. 831-839, 2004.
- BRITO, L. T. L., Cadernos do Semiárido: a água de chuva como potencial para aumentar a disponibilidade hídrica no semiárido brasileiro. 2 ed., CREA-PE, 2017.
- CAMPOS, T.; CANÉCHIO FILHO, V. **Principais culturas** – II. 2. Ed. Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1973
- CARMO, M. A. P.; CARVALHO, M. L. M.; SANTOS, H. O.; ROCHA, D. K.; OLIVEIRA, J. A.; SOUZA, V. F.; GUARALDO, M. M. S.; MESQUITA, C. A. M. Bioestimulantes aplicados em sementes e plantas de milho doces sob condições de estresse abiótico. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 3, p. 31727-31741, 2021.
- CARVALHO, H. W. L.; SOUZA, E. M. Ciclos de seleção de progênies de meios-irmãos do milho BR 5011 Sertanejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 6, p. 803-809, 2007.
- CASELA, C. R.; FERREIRA, A. S.; PINTO, N. F. J. A. **Doenças na cultura do milho**. Embrapa Milho e Sorgo (Circular Técnica – 83), 14 p., 2006.
- CASSOL, J. C.; DORNELLES, S. H. B.; SOARES, J. S.; NUNES, E. A.; LOPES, S. J. Silício na mitigação de estresse por frio em sementes de arroz tratadas com dietholate. **Revista Vivências**, v. 16, n. 31, p. 89-105, 2020. DOI: <https://doi.org/10.31512/vivencias.v16i31.183>
- CASSOL, J. C.; SPONCHIADO, D.; DORNELLES, S. H. B.; TABALDI, L. A.; BARRETO, E. P. M.; PIVETTA, M.; and LOPES, S. J. Silicon as an attenuator of drought stress in plants of *Oryza sativa* L. treated with dietholate. **Brazilian Journal of Biology**, v. 81, n. 4, p. 1061-1072, 2021.

- CASTRO, C. N. Sobre a agricultura irrigada no semiárido: uma análise histórica e atual de diferentes opções de política. **IPEA**, v. 2369, p. 1-56, 2018.
- CASTRO, S. R.; PATROCINIO, W. C. T.; SOUSA, K. D.; NASCIMENTO, A. R.; SOUZA, E. R. B.; SILVA, F. A. Efeitos da aplicação foliar de diferentes doses de silício no desenvolvimento de ervilha torta de flor roxa. **Contemporânea**, v. 3, n. 10, p. 17018-17037, 2023.
- CAVALCANTE JUNIOR, E. G.; MEDEIROS, J. F. DE; FREITAS, I. A. S.; OLIVEIRA, A. K. S. DE; SOBRINHO, J. E.; SILVA, J. P. N. DA; SILVA, T. G. F. Necessidade hídrica da cultura do milho influenciada pelas mudanças climáticas no semiárido nordestino. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 17, n. 2, p. 251-262, 2018.
- CAVALCANTI, F. L. A.; SANTOS, J. C. P.; PEREIRA, J. R.; LEITE, J. P.; SILVA, M. C. L.; FREIRE, F. J.; SILVA, D. J.; SOUSA, A. R.; MESSIAS, A. S.; FARIA, C. M. B.; BURGOS, N.; LIMA JÚNIOR, M. A.; GOMES, R. V.; CAVALCANTI, A. C.; LIMA, J. F. V. F. **Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco**, 2008. 212 p.
- CHAKMA, P. S.; SAEKONG, P.; BISWAS, A.; ULLAH, H.; DATTA, A. Growth, fruit yield, quality, and water productivity of grape tomato as affected by seed priming and soil application of silicon under drought stress. **Agricultural Water Management**, v. 256, 2021. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.107055
- COELHO, A. M. **Nutrição e adubação do milho**. Embrapa Milho e Sorgo (Circular Técnica, 78), p.10, 2006.
- COÊLHO, J. D. Milho: produção e mercados. **Caderno Setorial Etene: Banco do Nordeste do Brasil**, n. 210, 2021.
- CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Observatório Agrícola. Acompanhamento da safra de grãos, 2023.
- CONTINI, E.; MOTA, M. M.; MARRA, R.; BORGHI, E.; MIRANDA, R. A.; SILVA, A. F.; SILVA, D. D.; RODRIGUES, J.; MACHADO, A.; COTA, L. V.; COSTA, R. V.; MENDES, S. M. Série desafios do agronegócio brasileiro (NT2). **Milho-Characterização e Desafios Tecnológicos**. Embrapa, 2019.
- CRUSCIOL C. A. C.; PULZ, A. L.; LEMOS, L. B.; SORATTO, R. P.; LIMA, G. P. P. Effects of silicon and drought stress on tuber yield and leaf biochemical characteristics in potato. **Crop Science**, v. 49, n. 3, p. 949-954, 2009. DOI:10.2135/cropsci2008.04.0233
- CRUZ, J. C.; FILHO, I. A. P.; ALVARENGA, R. C.; NETO, M. M. G.; VIANA, J. H. M.; OLIVEIRA, M. F.; MATRANGOLO, W. J. R. Manejo da cultura do milho. In: CRUZ,

- J. C. (Ed.). Cultivo do milho. 4. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2008. (Embrapa Milho e Sorgo. Sistema de produção, 1).
<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/35327/1/Manejo-cultura.pdf>
- CURVÊLO, C. R. S.; RODRIGUES, F. A.; PEREIRA, L. F.; SILVA, L. C.; MATTA, F. M.; BERGER, P. G. Trocas gasosas e estresse oxidativo em plantas de algodoeiro supridas com silício e infectadas por *Ramularia areola*. **Bragantia**, v. 72, n. 4, p. 346-359, 2013.
- DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do Solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, cap. 3, p. 91-133, 2007.
- DHIMAN, P.; RAJORA N.; BHARDWAJ S.; SUDHAKARAN, S. S.; KUMAR, A.; RATURI, G.; CHAKRABORTY, K.; GUPTA, O. P.; DEVANNA, B. N.; TRIPATHI, D. K.; DESHMUKH, R. Fascinating role of silicon to combat salinity stress in plants: an updated overview. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 162, p. 110-123, 2021.
- EHLERINGER, J. R.; CERLING, E.T.; HELLIKER, B. R. C4 photosynthesis, atmospheric CO₂, and climate. **Oecologia**, v. 12, n. 112, p. 285-299, 1997.
- EICHOLZ, E. D.; BREDEMEIER, C.; BERMUDEZ, F.; MACHADO, J. R. A.; GARRAFA, M.; BISPO, N. B.; AIRES, R. F. Informações técnicas para o cultivo do milho e sorgo na região subtropical do Brasil: safras 2019/20 e 2020/21. **Embrapa Clima Temperado-Livro Técnico** (INFOTECA-E), p.13, 2020.
- EMBRAPA, E. B. DE P. A. **Cultivo do Milho**, n. 6, p. 10, 2010.
- FATIMA, R. T.; JESUS, E. G.; GUERRERO, A. C.; ROCHA, J. L. A.; BRITO, M. E. B. Adubação silicatada como atenuante do estresse hídrico no crescimento e trocas gasosas da alface. **Engenharia na Agricultura**, v. 27, n. 2, p. 170-178, 2019.
- FENG, J.; SHI, Q.; WANG, X.; WEI, M.; YANG, F.; & XU, H. Silicon supplementation ameliorated the inhibition of photosynthesis and nitrate metabolism by cadmium (Cd) toxicity in *Cucumis sativus* L. **Scientia Horticulturae**, v. 123, n. 4, p. 521–530, 2010. DOI:10.1016/j.scienta.2009.10.013
- FORNASIERI-FILHO, D. **Manual da cultura do milho**. 1ª Ed. Jaboticabal: FUNEP, 2007. 576 p.

- GARCÍA-LARA S.; SERNA-SALDIVAR S. O. Corn History and Culture. In: SERNA-SALDIVAR S. O. **Corn: Chemistry and Technology**. 3ª Ed. Duxford: Woodhead Publishing, 2019. p. 1-18.
- GONG, H. J.; CHEN, K. M.; ZHAO, Z. G.; CHEN, G. C.; ZHOU, W. J. Effects of silicon on defense of wheat against oxidative stress under drought at different developmental stages. **Biologia Plantarum**, v. 52, n. 3, p. 592–596, 2008. DOI:10.1007/ s10535-008-0118-0.
- GONG, H.; ZHU, X.; CHEN, K.; WANG, S.; ZHANG, C. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. **Plant science**, v. 169, n. 2, p. 313-321, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2005.02.023>
- GUIMARÃES, P. S.; ROCHA, D. S.; PATERNIANI, M. E. A. G. Z. Conteúdo de carboidrato foliar em híbridos de milho submetidos à restrição hídrica. **Evidencia**, v. 19, n. 2, p. 93-112, 2019.
- HATTORI, T.; INANAGA, S.; ARAKI, H.; AN, P.; MORITA, S.; LUXOVÁ, M.; LUX, A. Application of silicon enhanced drought tolerance in Sorghum bicolor. **Physiologia Plantarum**, v. 123, n. 4, p. 459-466, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2005.00481.x>
- HENRIQUE, I. G.; BOSQUEIRO, R. O.; KOTSUBO, R. M.; BOTELHO, S. C. C. Déficit hídrico e a germinação de sementes de híbridos de milho. **Nativa**, v. 9, n. 3, p. 240-246, 2021. DOI: <https://doi.org/10.31413/nativa.v9i3.9686>
- ISLAM, A.; AHUJA, L. R.; GARCIA, L. A.; MA, L.; SASEENDRAN, A. S.; TROUT, T. J. Modeling the impacts of climate change on irrigated corn production in the Central Great Plains. **Agricultural Water Management**, v. 110, n. 1, p. 94-108, 2012.
- JESUS, E. G.; FATIMA, R. T.; GUERRERO, A. C.; ARAÚJO, J. L.; BRITO, M. E. B. Growth and gas exchanges of arugula plants under silicon fertilization and water restriction. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 2, p.119-124, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n2p119-124>
- KORNDÖRFER, G.; SOUZA, S. R. Elementos benéficos. In: FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R. DE; SANTOS, L. A. **Nutrição Mineral de Plantas**, cap. 15, p. 563-599, 2018.
- LAYNEZ-GARSABALL, J; MÉNDEZ-NATERA, J; MAYZ-FIGUEROA, J. Influencia del tamaño de la semilla de maíz (Zea mays L.) en el crecimiento de la plántula en condiciones de salinidad. **IDESIA**, v. 25, n. 2, p. 23-35, 2007.

- LIANG, Y.; ZHU, J.; LI, Z.; CHU, G.; DING, Y.; ZHANG, J.; SUN, W. Role of silicon in enhancing resistance to freezing stress in two contrasting winter wheat cultivars. **Environmental and Experimental Botany**, v. 64, n. 3, p. 286–294, 2008. DOI:10.1016/j.envexpbot.2008.06.005
- LIU, P.; YIN, L.; WANG, S.; ZHANG, M.; DENG, X.; ZHANG, S.; TANAKA, K. Enhanced root hydraulic conductance by aquaporin regulation accounts for silicon alleviated salt induced osmotic stress in *Sorghum bicolor* L. **Environmental and Experimental Botany**, v. 111, p. 42–51, 2015.
- MA, J. F. 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. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, v. 11, n. 8, 392-397, 2006. DOI: 10.1016/j.tplants.2006.06.007
- MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. Fisiologia da Produção de Milho. **Embrapa Milho e Sorgo**, 2006.
- MAGALHÃES, P. C.; SOUZA, T. C.; RODRIGUES, J. A. Cultivo do Milho. Sistema de Produção, 2. Ecofisiologia. **Embrapa Milho e Sorgo**, 2011.
- MAGHSOUDI, K.; EMAM, Y.; ASHRAF, M. Influence of foliar application of silicon on chlorophyll fluorescence, photosynthetic pigments, and growth in water-stressed wheat cultivars differing in drought tolerance. **Turkish Journal of Botany**, v. 39, n. 4, p. 625–634, 2015.
- MAGHSOUDI, K.; EMAM, Y.; ASHRAF, M.; ARVIN, M. J. Alleviation of field water stress in wheat cultivars using silicon and salicylic acid applied separately or in combination. **Crop Pasture Science**, v. 70, n. 1, p. 36–43, 2019.
- MAGHSOUDI, K.; EMAM, Y.; NIAZI, A.; PESSARAKLI, M.; ARVIN, M. J. P5CS expression level and proline accumulation in the sensitive and tolerant wheat cultivars under control and drought stress conditions in the presence/absence of silicon and salicylic acid. **Journal Plant Inter**, v. 13, n. 1, p. 461–471, 2018.
- MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, n. 2, 889 p., 1995.
- MENEGALE, M. L. C.; CASTRO, G. S. A.; MANCUSO, M. A. Silício: interação com o sistema solo-planta. **Journal of Agronomic Sciences**, v. 4, n. especial, p. 435-454, 2015.
- MING, D. F.; PEI, Z. F.; NAEEM, M. S.; GONG, H. J.; ZHOU, W. J. Silicon Alleviates PEG-Induced Water-Deficit Stress in Upland Rice Seedlings by Enhancing Osmotic

- Adjustment. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 198, n. 1, p. 14-26, 2012.
<https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2011.00486.x>
- NABORS, M. W. Introdução à Botânica. **Roca**, 646p, 2012.
- NEERU, J.; SHALIESH, C.; VAISHALI, T.; PURAV, S.; MANOHERLAL, R. Role of Orthosilicic Acid (OSA) Based Formulation in Improving Plant Growth and Development. **Silicon**, v. 11, p. 2407-2411, 2019.
- RAHMAN; M. U., GUL, S.; AHMAD, I. Effects of water stress on growth and photosynthetic pigments of corn (*Zea mays* L.) cultivars. **International Journal of Agricultural & Biology**, v. 6, n. 4, p. 652 - 655, 2004.
- RAVEN, J. A. Cycling silicon-the role of accumulation in plant. **New Phytologist**, v. 158, n. 3, p. 419- 421, 2003.
- ROCHA JÚNIOR, R. L.; SILVA, F. D. S.; COSTA, R. L.; GOMES, H. B.; PINTO, D. D. C.; HERDIES, D. L. Bivariate Assessment of Drought Return Periods and Frequency in Brazilian Northeast Using Joint Distribution by Copula Method. **Geosciences**, v. 10, n. 4, p. 135, 2020.
- SANS, L. M. A.; SANTANA, D. P. Clima e Solo. In: CRUZ, J. C. **Cultivo do Milho**. 3ª ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2007.
- SANTOS, C. C.; TORRACA, D. S. M.; SILVERIO, J. M.; AND SCALONA, S. P. Q. Does silicon and salicylic acid contribute in the morphophysiology of *Schinus terebinthifolia* seedlings under flooding? **Brazilian Journal of Biology**, v. 83, e. 230935, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.270935>
- SANTOS, G. R.; SANTOS, E. M. C.; LIRA, E. S.; GOMES, D. L.; SOUZA, M. A.; ARAÚJO, K. D. Análise da precipitação pluvial e temperatura do ar de Olho D'água do Casado, Delmiro Gouveia e Piranhas, Alagoas. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 3, n. 1, p. 16-27, 2017b.
- SANTOS, R. D; PERREIRA, L. G. R; NEVES, A. L. A. et al. Características agronômicas de variedades de milho para produção de silagem. **Animal Sciences**, v. 32, n. 4, p. 367-373, 2010.
- SANTOS, W. M.; SOUZA, R.M. S.; SOUZA, E. S.; et al. Variabilidade espacial da sazonalidade da chuva no semiárido brasileiro. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 2, n. 4, p. 368-376, 2017a.
- SHEN, X.; ZHOU, Y.; DUAN, L; LI, Z.; ENEJI, A. E.; LI, J. Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and

- ultraviolet-B radiation. **Journal of Plant Physiology**, v. 167, n. 15, p. 1248-1252, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2010.04.011>
- SHIVARAJ, S. M.; MANDLIK, R.; BHAT, J. A.; RATURI, G.; RIVKA, E.; ALEXANDER, L., TRIPATHI, D. K.; DESHMUKH, R.; SONAH, H. Outstanding Questions on the Beneficial Role of Silicon in Crop Plants. **Plant and Cell Physiology**, v. 63, n. 1, p. 4–18, 2022. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcab145>
- SILVA, J. A.; SOUZA, N. G. M.; MAIA, J. M.; SILVA, J. B.; MELO, A. S. Políticas públicas voltadas para a agricultura familiar no semiárido brasileiro. **Revista BioFarm**, v. 12, n. 3, p. 1-13, 2016.
- SILVA, S.; SOUSA, A. C. DA P.; SILVA, C. S. DA; ARAÚJO, E. R.; SOARES, M. A. DA S.; e TEODORO, I. Parâmetros produtivos do milho sob déficit hídrico em diferentes fases fenológicas no semiárido brasileiro. **Irriga**, Edição Especial – Nordeste, v. 1, n. 1, p. 30-41, 2021.
- SIRISUNTORNLAK, N.; GHAFOORI, S.; DATTA, A.; & ARIROB, W. Seed priming and soil incorporation with silicon influence growth and yield of maize under water-deficit stress. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 65, n. 2, p. 197–207, 2019. DOI:10.1080/03650340.2018.1492713
- SOUZA JUNIOR, G. S.; HURTADO, A. C.; SOUZA JUNIOR, J. P.; PRADO, R. M.; PICCOLO, M. C.; SANTOS, D. M. M. Beneficial Role of Silicon on Regulating C, N, and P Stoichiometric Homeostasis and the Growth of Sugarcane Seedlings under Aluminum Toxicity. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 1, n. 3, p. 1-15, 2022.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. Fisiologia e desenvolvimento vegetal. **Artmed**, 6ª ed., 2017.
- TAO, F.; YOKOZAWA, M.; LIU, J.; ZHANG, Z. Climate-crop yield relationships at province scale in China and the impacts of recent climate trend. **Climate Research**, v. 38, n. 1, p. 83-94, 2008.
- TAO, F.; YOKOZAWA, M.; ZHANG, Z.; HAYASHI, Y.; GRASSL, H.; FU, C. Variability in climatology and agricultural production in China in association with East Asia Monsoon and EL Niño southern oscillation. **Climate Research**, v. 28, n. 1, p. 23-30, 2004.

- TAO, F.; ZHANG, Z. Impacts of climate change as a function of global mean temperature: maize productivity and water use in China. **Climatic Change**, v. 105, n. ¾, p. 409-432, 2011.
- TEMIZ, C. C., TÉLLEZ, L. I., TREJO, V. J., MERINO, F. C. G. Efecto de los elementos benéficos Al, Co, Se y Si en la nutrición de elicônias (*Heliconia* sp.). **Agro Productividad**, v. 10, n. 3, p. 62-68, 2017.
- ULLAH, H.; LUC, P. D.; GAUTAM, A.; DATTA, A. Growth, yield and silicon uptake of rice (*Oryza sativa*) as influenced by dose and timing of silicon application under water deficit stress. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 64, n. 3, p. 318–330, 2018.
- VALICENTE, F. H. **Manejo Integrado de Pragas na Cultura do Milho**. Embrapa Milho e Sorgo (Circular Técnica – 208), 13 p., 2015.
- VIÇOSI, K. A.; FERREIRA, A. A. S.; OLIVEIRA, L. A. B.; RODRIGUES, F. Estresse hídrico simulado em genótipos de feijão, milho e soja. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 4, n. 5, p. 36-42, 2017.
- WENNECK, G. S.; SAATH, R.; REZENDE, R.; ANDREAN, A. F. B. A.; SANTI, D. C. Agronomic response of cauliflower to the addition of silicon to the soil under water deficit. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 51, e66908, 2021.
- ZUFFO, A. M.; AGUILERA, J. G. **Agronomia: Avanços e Perspectivas**. 2ª ed. Pantanal: Nova Xavantina, 2020. 137 p.

-----CAPÍTULO II-----

**INFLUÊNCIA DA APLICAÇÃO DE SILÍCIO NO CRESCIMENTO E
ECOFISIOLOGIA DO MILHO SOB CONDIÇÕES DE ESTRESSE HÍDRICO**

CAPÍTULO II – INFLUÊNCIA DA APLICAÇÃO DE SILÍCIO NO CRESCIMENTO E ECOFISIOLOGIA DO MILHO SOB CONDIÇÕES DE ESTRESSE HÍDRICO

Resumo: A reduzida disponibilidade de água no solo é um dos precursores de estresse na planta, responsável pela diminuição do crescimento e de perdas na produtividade das mesmas, por dificultar a manutenção dos processos metabólicos essenciais. Muitos resultados experimentais têm demonstrado o efeito do silício (Si) como atenuador de estresses ambientais em plantas. Assim, objetivou-se com a presente pesquisa avaliar o crescimento e a ecofisiologia da cultura do milho submetido ao estresse hídrico e à aplicação de silício no semiárido Alagoano. O delineamento experimental utilizado foi em faixas com quatro repetições, esquematizado em parcelas subdivididas. A cultura foi submetida a uma combinação de cinco condições de estresse hídrico (1, 4, 7, 10 e 13 dias de turno de rega) e duas condições de disponibilidade de Si (com e sem Si). Foram medidos os graus-dia nas diferentes fases fenológicas da cultura. Também foram analisadas as seguintes variáveis da planta: altura do dossel, diâmetro do colmo, índice de área foliar, acúmulo de massa fresca e seca das plantas e as trocas gasosas. Constatou-se que quanto maior o intervalo de irrigação, menor foi o crescimento, o acúmulo de biomassa e as trocas gasosas das plantas. A aplicação de Si proporcionou maiores índices de área foliar e aumentou a matéria fresca e seca da parte aérea das plantas. O uso Si na fertilização de plantas em condições de déficit hídrico é uma alternativa viável.

Palavras-chave: trocas gasosas, turno de rega, silicato, *Zea mays* L.

INFLUENCE OF SILICON APPLICATION ON THE GROWTH AND ECOPHYSIOLOGY OF CORN UNDER CONDITIONS OF WATER STRESS

Abstract: The low availability of water in the soil is one of the precursors of stress in the plant, responsible for the decrease in growth and losses in crop productivity, by hindering the maintenance of essential metabolic processes. Many experimental results have demonstrated the effect of silicon (Si) as an attenuator of environmental stresses in plants. Thus, the objective of this research was to evaluate the growth and ecophysiology of the corn crop subjected to water stress and the application of silicon in the semi-arid region of Alagoas. The experimental design used was in strips with four replications, schematized in subdivided plots. The culture was subjected to a combination of five water stress conditions (1, 4, 7, 10 and 13 days of intervals of irrigation) and two conditions of availability of Si (with and without Si). Day-degrees were measured in the different phenological phases of the crop. The following plant variables were also analyzed: canopy height, stem diameter, leaf area index, accumulation of fresh and dry mass of plants and gas exchange. It was found that the longer the irrigation interval, the lower the growth, accumulation of biomass and gas exchange of the plants. The application of Si provided higher rates of leaf area and increased the fresh and dry matter of the aerial part of the plants. The use of Si in plant fertilization in water deficit conditions is a viable alternative.

Key words: gas exchange, irrigation intervals, silicate, *Zea mays* L.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da população mundial e a consequente alta na demanda por alimentos é uma preocupação recorrente na busca por sistemas agrícolas mais produtivos e sustentáveis (Calicioglu et al., 2019). A água é um recurso que determina e ao mesmo tempo limita o desenvolvimento, e, conseqüentemente, a produtividade das plantas, uma vez que constitui a matriz e o meio onde ocorre a maioria dos processos bioquímicos essenciais à vida dos vegetais (Lehninger, 2006).

Um dos principais causadores de estresse nas plantas é a disponibilidade hídrica (Araújo Júnior, et al., 2019). As plantas podem sofrer danos tanto por excesso como por falta de água, sendo o déficit hídrico o causador mais comum de estresse nas culturas. O déficit hídrico é definido pela falta de água no solo para a demanda da cultura, o que leva a absorção de água e alguns nutrientes pelo sistema radicular da planta a ser reduzido, causando prejuízos (Campos et al., 2021).

Em cada fase de desenvolvimento as plantas possuem uma demanda hídrica diferente, o que contribui para os processos que auxiliam a planta a sintetizar os fotoassimilados que, conseqüentemente, desencadearão na produção vegetal (Epstein e Bloom, 2006). Os diferentes processos fisiológicos do milho, tais como as trocas gasosas, podem ser afetados pelo nível de estresse hídrico, dependendo do estágio fisiológico da cultura, causando variações expressivas no rendimento e na qualidade dos grãos, pois as repostas ao estresse hídrico influenciam a eficiência no uso da água, o crescimento e a produtividade (Freitas et al, 2020; Almeida et al., 2020; Silva et al., 2021).

O silício (Si), fisiologicamente, não é um elemento essencial às plantas, mas é um elemento benéfico para o crescimento e desenvolvimento das mesmas, sendo a absorção, o transporte e o acúmulo do elemento indispensáveis aos vegetais (Gaur et al., 2020). O elemento é absorvido de maneira ativa e transportado até órgãos vegetais como folha, caule e colmo, que posteriormente precipita e se associa ao enrijecimento da parede celular e então, os benefícios são atingidos, como maior resistência a fatores bióticos e abióticos, que normalmente causam prejuízos fisiológicos e de rendimento (Cassel et al., 2021).

Quando o Si se acumula sob a cutícula da folha, é formada uma camada dupla que cria uma barreira extra para evitar a perda de água, podendo reduzir a transpiração e aumentar

os reforços estruturais que alteram a taxa fotossintética para aumentar a eficiência do uso da água (Rea et al., 2022). O fornecimento de Si contribui para manter o conteúdo de água no tecido foliar e diminuir os danos causados pelo déficit hídrico, proporcionando maior produção de massa (Teixeira et al., 2020).

O cultivo de milho na região do Semiárido Alagoano é imprescindível para a agricultura de subsistência, no entanto, devido às irregularidades das chuvas e o estresse causado pelo déficit hídrico, a cultura apresenta baixa produtividade em relação à média nacional. Diante de cenários de mudanças climáticas, é necessário o estudo e o desenvolvimento de técnicas e tecnologias visando o manejo de culturas de importância socioeconômica e a disponibilidade da informação tecnológica para o produtor irrigante aumentar a eficiência de uso da água.

Assim, objetivou-se com este estudo avaliar o crescimento e a ecofisiologia da cultura do milho submetido ao estresse hídrico e à aplicação de silício no semiárido Alagoano.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Fluxo de água no solo

O armazenamento de água no sistema radicular da cultura (ARM) no dia foi calculado através da Equação 2, em que a umidade foi determinada em função da equação da curva de retenção de água no solo para as profundidades de 0 – 20 cm (Equação 3) e 20 – 40 cm (Equação 4), utilizando-se as medidas de tensão de água no solo e considerando limite do solo em armazenar água (CAD). Para o cálculo do fluxo de água no solo, foi considerado que o ARM é igual a CAD logo após o plantio até os 20 DAP, pois foi realizada a irrigação com esta finalidade.

$$ARM_{i(0-40)} = (\theta_a - \theta_{PMP}) 1000 Z \quad (2)$$

Em que: ARM_i – armazenamento de água no solo (mm); θ_a – umidade calculada ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); θ_{PMP} – umidade no ponto de murcha permanente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); Z – profundidade (m).

$$\theta = 2,47x^{-0,07} \quad (3)$$

$$\theta = 2,212x^{-0,1} \quad (4)$$

2.2. Análises biométricas e fenológicas da cultura

Ao longo do crescimento e do desenvolvimento da cultura, foram analisadas as seguintes variáveis biométricas: índice de área foliar (IAF), altura do dossel vegetativo e diâmetro do colmo, medidos quinzenalmente a partir dos 30 dias após o plantio (DAP). Foram marcadas cinco plantas na área útil das subparcelas, escolhidas aleatoriamente, para as análises biométricas. O IAF foi calculado pela Equação 5:

$$IAF = \frac{AF \times NP}{\epsilon \times H} \quad (5)$$

Em que: AF – é a área foliar (m²); Np – é o número de plantas na linha de contagem; ϵ – é o espaçamento médio entre linhas (m); e H – é o comprimento da linha de contagem das plantas (m).

A área foliar foi determinada pela equação $AF = C \times L \times 0,75 \times (N+2)$, conforme a metodologia de Hermann e Câmara (1999), em que C é o comprimento da “folha +3” (m); L a largura da “folha +3” (m); 0,75 é o fator de correção de forma das folhas de milho; e N o número de folhas fotossinteticamente ativas.

As fases fenológicas da cultura foram monitoradas por meio da avaliação do estande de plantas, considerando 50% + 1 planta na mudança de fase, em que foi contabilizada a necessidade térmica da cultura para completar um subperíodo ou atingir as fases fenológicas após a semeadura através dos graus-dia acumulados (GDA) ou soma dos graus-dia (GD), de acordo com a Equação 6 (Gilmore e Rogers, 1958).

$$GD = \sum_{i=1}^n (T_i - T_b) \quad (6)$$

Em que: T_i – temperatura média do ar no dia i (°C); T_b – é a temperatura base do milho, igual a 10 °C.

2.3. Trocas gasosas foliares

As avaliações das trocas gasosas foliares foram realizadas no período de início da fase de pendoamento, por meio da utilização do Analisador Portátil de Gás Infravermelho (Infra-Red Gas Analyzer – IRGA) modelo Li 6400 XT (LI-COR), sob radiação fotossinteticamente ativa mantida em 2500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, na folha + 3. As leituras foram realizadas entre as 11 e 13 horas, horário de brilho do sol intenso e elevada demanda

evapotranspirométrica, para evitar instabilidades causadas por variações rápidas da radiação solar. Foram avaliadas as seguintes variáveis fisiológicas: temperatura foliar – T_{leaf} (°C), a concentração interna de CO_2 – C_i ($\mu\text{mol mol}^{-1}$), a condutância estomática – g_s ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$), a transpiração – E ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$), a fotossíntese líquida – A ($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$), a eficiência instantânea de uso da água – A/E ($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}/\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e a eficiência intrínseca do uso da água – A/g_s ($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}/\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

2.4. Determinação da fitomassa fresca e seca das plantas

A cada avaliação biométrica foi avaliada a fitomassa fresca e seca em uma planta de uma das linhas da subparcela, sendo a fitomassa vegetal coletada, pesada, sub-amostrada e seca em estufa a 65°C até a obtenção de peso constante, determinando-se a seguir a produção de fitomassa seca. Foram determinadas a massa fresca e seca da parte aérea, formada pelas massas das folhas, colmo e pendão, e a massa fresca e seca da espiga.

2.5. Análises estatísticas

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo teste F ($p < 0,05$ e $p < 0,01$), e havendo significância no fator qualitativo, foram submetidos ao teste de comparação de médias, teste de Tukey ($p < 0,05$), e o fator quantitativo foi submetido à regressão polinomial na análise de variância, decompondo-se os graus de liberdade em componentes de regressão. Para isso foi utilizado o programa estatístico Sisvar versão 5.8 (Ferreira, 2019). A escolha do modelo que melhor se ajustou aos dados foi baseada nos seguintes critérios: maior valor do coeficiente de determinação (R^2), significância dos parâmetros da equação de ajuste ($p < 0,05$), no efeito não significativo do desvio de regressão e na explicação biológica de cada variável em função dos tratamentos avaliados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Fluxo de água no solo

A estimativa da umidade do solo em função do balanço real de água no solo apresentada na Figura 1 evidencia que no início do ciclo de cultivo todos os tratamentos permaneceram com o armazenamento de água no solo (ARM) próximo à capacidade de campo (limite máximo igual à CAD) e a partir dos 21 DAP observa-se variação no ARM com a aplicação dos diferentes intervalos da irrigação.

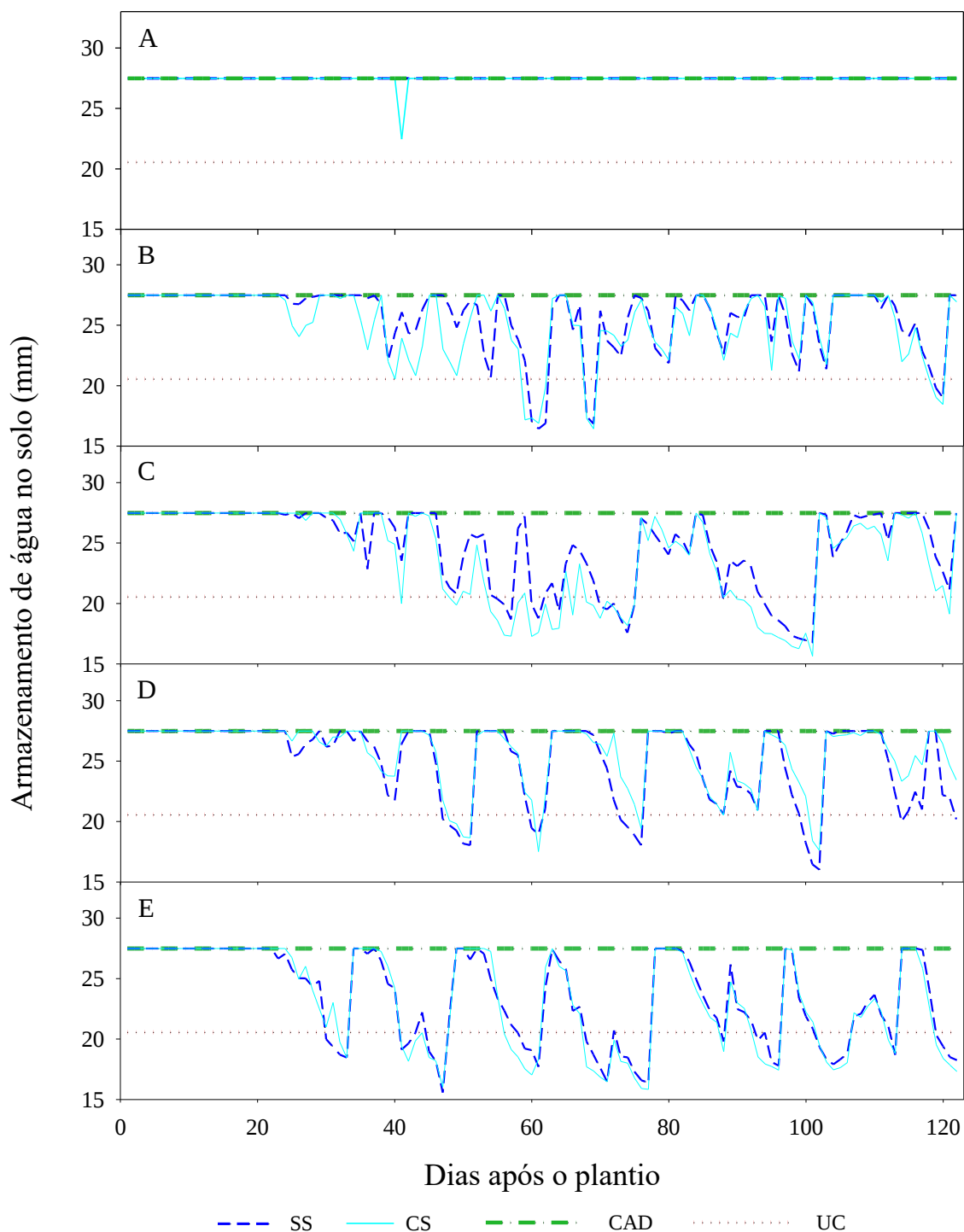


Figura 1. Armazenamento de água no solo para os tratamentos 1 dia de TR (A), 4 dias de TR (B), 7 dias de TR (C), 10 dias de TR (D) e 13 dias de TR (E) ao longo dos dias após o plantio do milho cultivado em Piranhas, AL (SS – sem silício; CS – com silício; CAD — capacidade de água disponível; UC – umidade crítica).

O tratamento de 1 dia de turno de rega (TR) manteve o ARM próximo ou igual à CAD (Figura 1A), enquanto que os demais tratamentos apresentaram muita variação no ARM,

em que os eventos de irrigação e de chuvas promoveram aumento no ARM desses tratamentos, elevando-os para a zona da água facilmente disponível (AFD), que é a linha da umidade crítica (UC) quando o ARM aproximava-se ou ultrapassava a UC. É possível observar pequenas diferenças no ARM dos tratamentos com e sem Si dentro dos TR, mas que seguiram um padrão semelhante do fluxo de água durante todo o ciclo.

O tratamento de 4 dias de TR manteve o ARM dentro da AFD por mais tempo em comparação aos TR maiores (Figura 1B). Para os TR de 7 e 10 dias, observa-se redução gradual no ARM em função dos eventos de irrigação, e menores variações do ARM ao final do ciclo devido aos eventos de chuva no período (Figuras 1C e 2D, nesta ordem). Como se pode observar na Figura 1E, o TR de 13 dias apresentou grande redução no armazenamento entre irrigações durante o ciclo por ser um intervalo maior de reposição de água no solo.

O TR de 13 dias apresentou ARM abaixo da UC por mais vezes em relação aos demais tratamentos durante o ciclo de cultivo, sendo 38 dias no tratamento sem Si e 41 dias no tratamento com Si. No TR de 1 dia não ocorreu ARM abaixo da UC, enquanto que o TR de 4 dias com e sem Si tiveram 7 e 10 dias de ARM abaixo da UC, respectivamente. Apesar do intervalo ser maior, o TR 10 dias teve menor quantidade de dias com ARM abaixo da UC (16 e 9 dias nos tratamentos com e sem Si, nesta ordem) em comparação ao tratamento de 7 dias de TR com e sem Si (21 e 36 dias, respectivamente).

3.2.Crescimento e fenologia da cultura

A exigência térmica da cultura para o ciclo foi de 2.139,2 °C (Tabela 1), caracterizando-a como tardia conforme Fancelli e Dourado-Neto (1997). O estágio intermediário, que compreende a fase VT até a fase R5 da cultura, apresentou maior necessidade térmica de que o estágio de crescimento (V6 até V14), que por sua vez, exigiu maior acúmulo térmico de que o estágio inicial (VE até V5). O maior acúmulo térmico no estágio intermediário se deu principalmente pela maior duração das fases fenológicas.

Tabela 1. Graus-dia acumulados e fenologia da cultura do milho cultivado em Piranhas-AL entre os meses de fevereiro e junho de 2023.

DAP	Estádio	Fase fenológica	GDA
0		Plantio	°C
5	INICIAL	Emergência (VE)	91,0
7		V2	128,8
11		V3	204,9
13		V4	242,4
17		V5	316,0
22	CRESCIMENTO	V6	297,4
25		V7	464,3
29		V8	540,3
34		V9	633,6
37		V10	688,1
39		V11	723,7
41		V12	760,7
43		V13	794,0
46		V14	845,0
47	INTERMED	Pendoamento (VT)	862,8
48		Polinização (R1)	880,3
55		Grão bolha d'água (R2)	1003,3
70		Grão Leitoso (R3)	1268,2
83		Grão Pastoso (R4)	1500,8
121	FINAL	Grão Farináceo (R5)	2124,7
122		Maturação fisiológica (R6)	2139,2

De acordo com a análise de variância, todas as variáveis de crescimento apresentaram diferença significativa para o fator estresse hídrico (turnos de rega - TR), no nível de 1% de probabilidade pelo teste de Fisher (Tabela 2). Já para o fator de variação silício (aplicação ou não aplicação), houve diferença significativa apenas para as variáveis diâmetro do colmo (DC) e índice de área foliar (IAF) à 5 e 1% de probabilidade, respectivamente. Em relação à interação destes fatores, apenas a altura do dossel (AD) apresentou diferença significativa.

Tabela 2. Resumo da análise de variância para as variáveis de altura do dossel (AD), diâmetro do colmo (DC) e índice de área foliar (IAF) em função dos fatores estresse hídrico (turnos de rega - TR), silício (com e sem aplicação) e idade (dias após o plantio) na cultura do milho cultivado no semiárido Alagoano.

FV	GL	Quadrados médios		
		AD	DC	IAF
Bloco	3	1,03 ^{**}	50,25 ^{ns}	1,76 ^{**}
Estresse (E)	4	7,41 ^{**}	248,12 ^{**}	14,13 ^{**}
Silício (S)	1	0,01 ^{ns}	49,50 [*]	1,28 ^{**}
Idade (I)	7	7,02 ^{**}	162,87 ^{**}	58,90 ^{**}
E x S	4	0,32 ^{**}	4,30 ^{ns}	0,07 ^{ns}
E x I	28	0,09 ^{**}	14,47 ^{**}	0,11 ^{**}
S x I	7	0,00 ^{ns}	22,36 ^{ns}	0,99 ^{ns}
CV E (%)		15,45	17,85	26,01
CV S (%)		6,75	13,76	25,33
Média geral		1,9	23,8	1,36

FV: Fator de variação; GL: Graus de liberdade; CV: Coeficiente de variação; ^{ns}: não significativo; ^{**} e ^{*}: significativo à 1 e 5%, respectivamente, pelo teste de Fisher.

Para o fator idade das plantas (I), a análise de variância demonstrou que houve diferença significativa entre os tratamentos aplicados para todas as variáveis de crescimento avaliadas à 1% de probabilidade (Tabela 2), e que este fator apresentou interação significativa somente com o estresse hídrico, também à 1% de probabilidade sobre todas as variáveis de crescimento.

Observa-se resposta quadrática para a altura do dossel das plantas tratadas com aplicação de Si, em que a maior altura (2,41 m) foi obtida com 1 dia de turno de rega (Figura 2A). Já as plantas tratadas sem a aplicação de Si apresentaram redução linear na altura do dossel em função dos TR. Observa-se que a máxima altura do dossel obtida pelas plantas sem aplicação de Si foi de 1,97 m obtida com a aplicação de 1 TR e a menor altura foi de 1,19 m obtida com 13 TR. O desdobramento dos turnos de rega dentro da aplicação ou não de silício (Figura 2A) evidenciou diferença significativa para a aplicação de silício apenas no tratamento com 1 TR. Para os demais turnos de rega (4, 7, 10 e 13) não se constatou diferença entre a aplicação ou não de silício nas plantas.

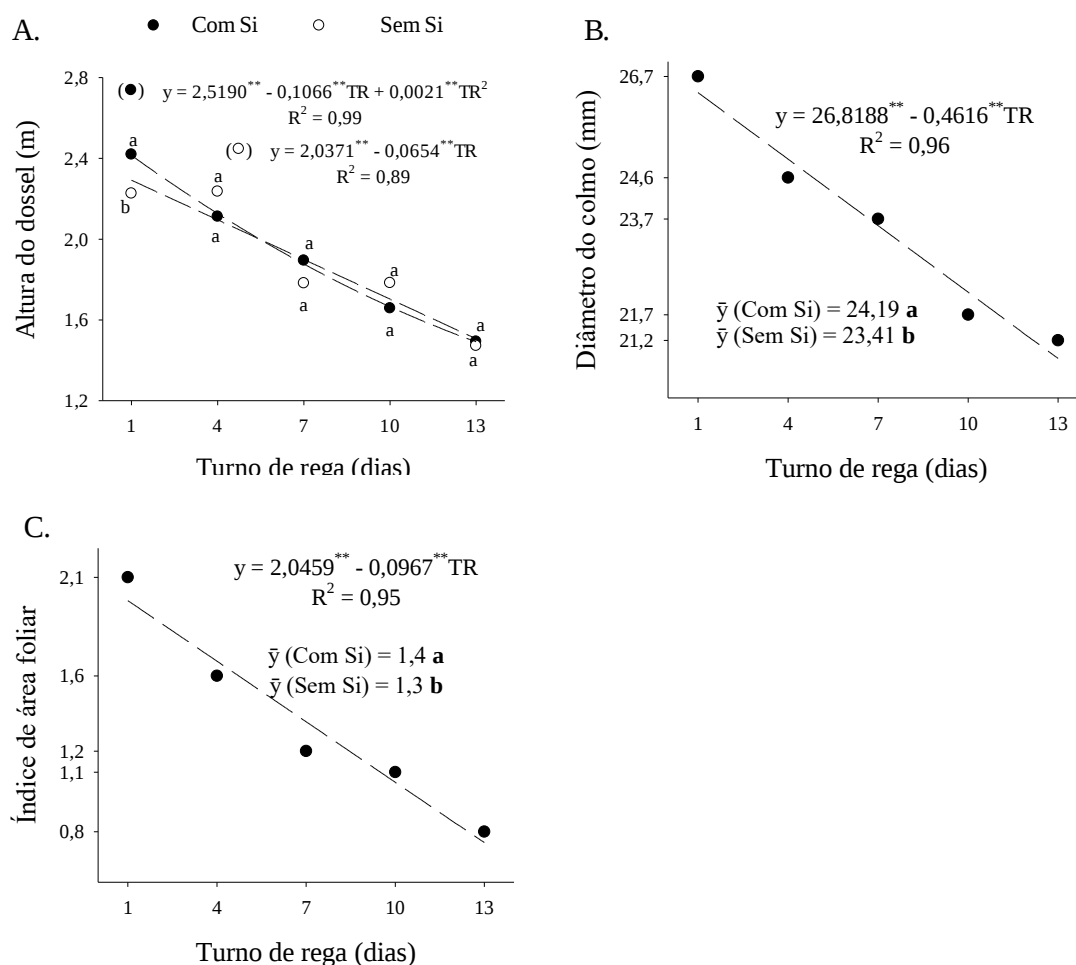


Figura 2. Efeito da interação dos fatores estresse hídrico (turnos de rega - TR) e aplicação de silício sobre a altura do dossel (A) e efeito isolado destes fatores sobre o diâmetro do colmo (B) e o índice de área foliar – IAF (C) na cultura do milho cultivado no semiárido Alagoano.

O diâmetro do colmo apresentou efeito linear decrescente à medida em que se aumentaram os turnos de rega (Figura 2B). Observa-se que as plantas que receberam água diariamente apresentaram maiores diâmetros dos colmos, com média de 26,3 mm, enquanto que as plantas que receberam água a cada 13 dias apresentaram menores diâmetros dos colmos, com média de 20,8 mm. Essa diferença entre o menor e o maior nível de estresse hídrico é de 79%. Conforme o teste de comparação de médias (Figura 2B), as plantas tratadas com a aplicação de silício apresentaram maior média de diâmetro do colmo em comparação as plantas tratadas sem a aplicação do nutriente, com diferença de 0,78 mm.

As plantas irrigadas diariamente apresentaram maiores médias de IAF, comparadas às plantas dos demais tratamentos, com média de 1,9 (Figura 2C). Isso representa um acréscimo de 143,58% em relação ao tratamento de maior nível de estresse hídrico (TR de 13 dias), que teve média de 0,78. O modelo de regressão linear indica correlação de 95% entre os níveis de estresse hídrico e o IAF, indicando que o IAF depende dos turnos de rega. De acordo com o teste de Tukey, houve diferença significativa à 5% de probabilidade entre as médias dos tratamentos com e sem silício para o IAF (Figura 2C). O IAF das plantas tratadas com a aplicação de silício foi maior em comparação às plantas tratadas sem a aplicação do elemento, com médias de 1,4 e 1,3, respectivamente.

Nilahyane et al (2020) estudando o desempenho do milho cultivado em região semiárida sob condições de limitação hídrica, constataram que o déficit hídrico afeta negativamente o crescimento das plantas pela diminuição da altura do dossel, e consequentemente, redução do acúmulo de biomassa. Bukhari et al. (2021) observaram redução nos parâmetros agronômicos na cultura do trigo em função do estresse hídrico, no entanto, a fertilização com Si mostra maior taxa de crescimento. Por outro lado, Neri (2009) verificou que a aplicação de silício em cultivares de milho não afetou a altura das plantas.

A diminuição da altura das plantas pode ser explicada pela associação entre o sistema radicular e a parte aérea (A/R) variarem em função dos fatores ambientais nos diversos estágios de desenvolvimento da planta, pois em condições de déficit hídrico ocorre uma redução no valor de A/R, por causa da inibição do crescimento da parte aérea e do maior crescimento das raízes (Fornasieri Filho, 2007).

O menor crescimento do diâmetro do colmo das plantas submetidas aos maiores níveis de turnos de rega pode estar relacionado à produção de ácido abscísico (ABA), uma vez que este é considerado um hormônio que retarda o crescimento vegetal e por isso aumenta em plantas estressadas por falta de água. Quando sinalizado pela raiz, o ABA promove redução na taxa de transpiração da planta pelo fechamento estomático, influenciando a taxa de absorção de nutrientes e, consequentemente, a fisiologia e morfologia das plantas sob estresse hídrico (Taiz e Zeiger, 2013).

O índice de área foliar determina a interceptação da luz, sendo um parâmetro importante na avaliação do crescimento e rendimento das culturas. Soumya et al. (2020),

estudando a aplicação de Si na cultura do arroz, observaram aumento no índice de área foliar das plantas em relação às plantas sem disponibilização do elemento. Badawy et al. (2021) observaram que a aplicação de Si aumenta o IAF em plantas de arroz em condições de estresse ambiental. O acúmulo de Si nos tecidos vegetais proporciona melhor estrutura e arquitetura das plantas, aumentando o contato com a luz solar, que por sua vez, aumenta as taxas fotossintéticas resultando em maior crescimento e produção de biomassa.

Plantas em condições irrigadas crescem mais em relação às plantas em condições de déficit hídrico (Rocha et al., 2021). Em condições de estresse hídrico, a maioria dos vegetais busca alternativas para diminuir o consumo de água, reduzindo principalmente a transpiração e dentro das adaptações mais conhecidas, tem-se a redução da área foliar através da diminuição da quantidade de folhas e do tamanho das folhas individuais (Taiz e Zeiger, 2013).

A ocorrência de estresse hídrico na fase vegetativa do milho reduz drasticamente a área foliar (Silva et al., 2023). Quanto menor a expansão foliar, menor é a produção de assimilados pela fotossíntese que são fixados e armazenados, o que reflete na produção de biomassa. Com a redução da fotossíntese, há diminuição do crescimento, uma vez que poucos metabólicos são produzidos. Os produtos da fotossíntese são essenciais para nutrir e garantir a perpetuação da espécie e, não restando quantidades suficientes para serem armazenados, refletem no baixo crescimento vegetal (Taiz e Zeiger, 2013).

O silício tem demonstrado efeito benéfico no crescimento e desenvolvimento das plantas (Ma e Yamaji, 2008). O incremento na altura de plantas de milho pode estar ligado ao maior acúmulo de matéria seca, provocado pela função que o silício desempenha no metabolismo celular, sendo responsável pela ativação de enzimas importantes (Correa et al., 2005).

Observa-se resposta logística para a altura do dossel das plantas de milho com diferença entre os níveis de estresse hídrico em função dos dias após o plantio (DAP) (Figura 3). As plantas tratadas com disponibilidade hídrica apresentaram maior crescimento da altura do dossel em comparação às plantas tratadas com restrição hídrica. A altura máxima das plantas tratadas com 1TR foi de 2,53 m aos 135 DAP. Para esse tratamento, o aumento exponencial na altura do dossel das plantas ocorreu até os 75 DAP, e posteriormente, observa-se a tendência à estabilidade. As plantas tratadas com o maior

nível de déficit hídrico (13TR) apresentaram altura máxima de 1,62 m aos 135 DAP e tendência à estabilidade de crescimento iniciada aos 60 DAP.

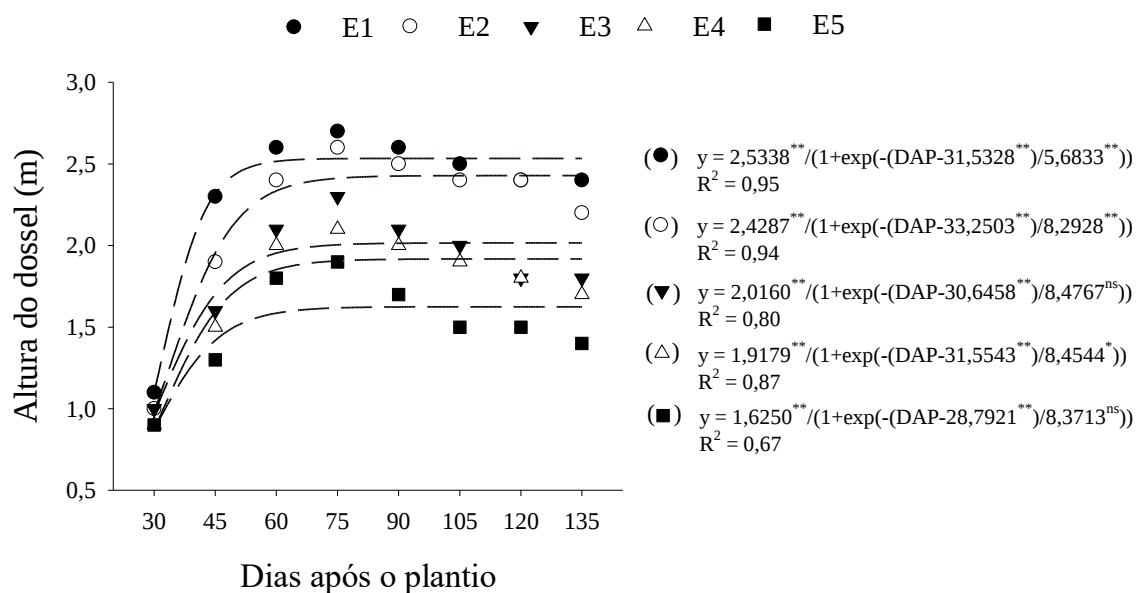


Figura 3. Efeito da interação da idade das plantas (dias após o plantio) e níveis de estresse hídrico sobre a altura do dossel na cultura do milho cultivado no semiárido Alagoano (os níveis de estresse hídrico E1, E2, E3, E4 e E5 correspondem aos TR de 1, 4, 7, 10 e 13 dias, respectivamente).

O diâmetro do colmo apresentou redução em função dos níveis de estresse hídrico e dos DAP (Figura 4). Conforme a análise de regressão, essa redução foi linear para os TR 1, 4 e 7, enquanto que para os TR de 10 e 13 dias, a resposta foi quadrática. As plantas tratadas com o TR de 1 dia apresentaram maior diâmetro do colmo aos 30 DAP (29,66 mm), já as plantas tratadas com o maior nível de estresse hídrico (13 dias de TR) apresentaram diâmetro de colmo máximo aos 71,66 DAP (22,61 mm).

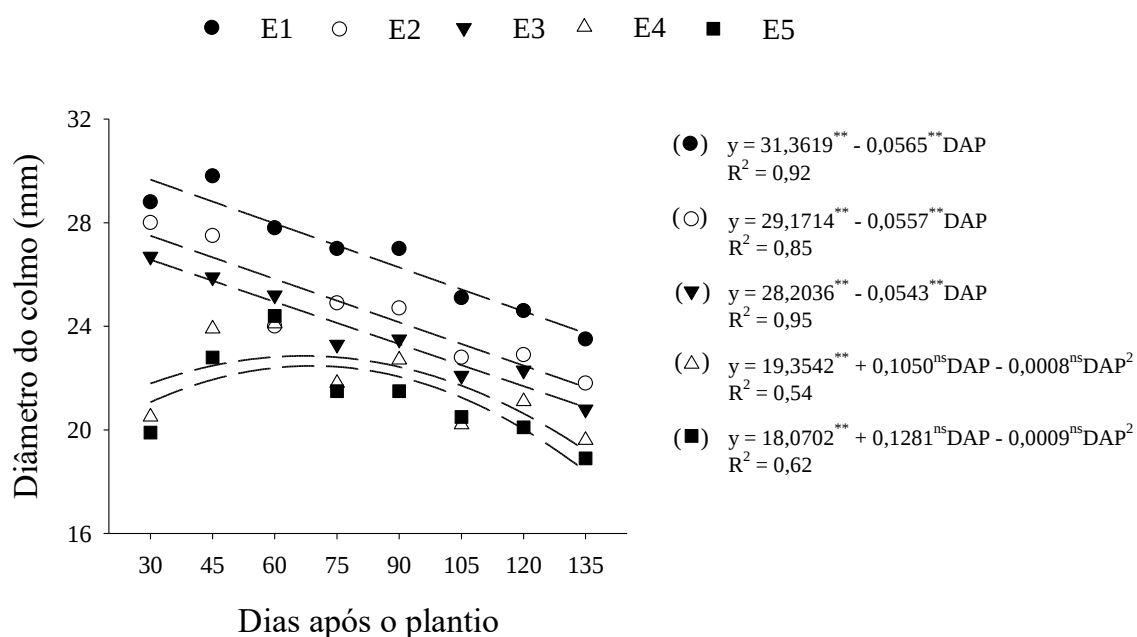


Figura 4. Efeito da interação da idade das plantas (dias após o plantio) e níveis de estresse hídrico sobre o diâmetro do colmo na cultura do milho cultivado no semiárido Alagoano (os níveis de estresse hídrico E1, E2, E3, E4 e E5 correspondem aos TR de 1, 4, 7, 10 e 13 dias, respectivamente).

Observa-se resposta exponencial para o índice de área foliar (IAF) com diferença entre os níveis de estresse hídrico em função dos DAP (Figura 5), em que o aumento da restrição hídrica provocou redução no IAF das plantas. O IAF máximo das plantas tratadas com 1 dia de TR foi de 4,24 observado aos 59 DAP, enquanto que para as plantas tratadas com 13 dias de TR o máximo IAF foi de 2,38, também observado aos 58 DAP.

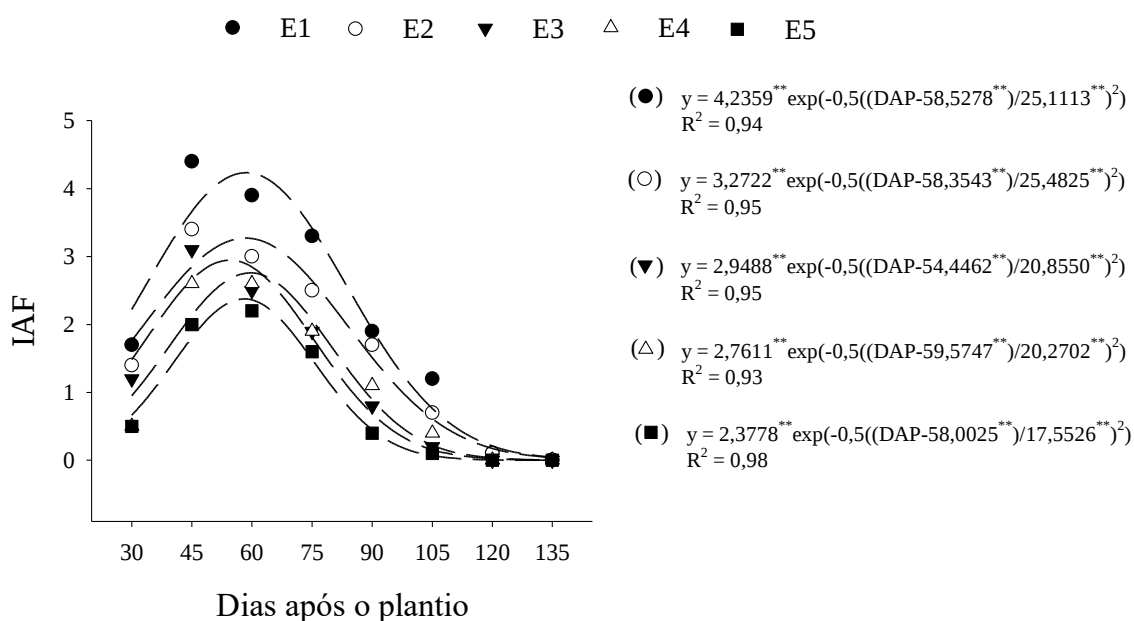


Figura 5. Efeito da interação da idade das plantas (dias após o plantio) e níveis de estresse hídrico sobre o índice de área foliar (IAF) na cultura do milho cultivado no semiárido Alagoano (os níveis de estresse hídrico E1, E2, E3, E4 e E5 correspondem aos TR de 1, 4, 7, 10 e 13 dias, respectivamente).

O crescimento da planta é fortemente influenciado pela interação do ambiente com a genética da espécie (Gardner et al., 2010). Portanto, a variação nos parâmetros de crescimento das plantas com o mesmo material genético indica que as condições ambientais influenciaram mais fortemente a resposta sobre o crescimento. Subaedah et al. (2021) estudando o efeito do tempo de colheita no crescimento de variedades de milho doce, observaram maior altura de plantas aos 75 DAP, com média de 1,62 m. Yang et al. (2020) avaliando altura de plantas e diâmetro do colmo em região semiárida, observaram crescimento estável do milho doce dos 70 até 91 DAP, respectivamente.

Essa redução no crescimento das plantas em função do déficit hídrico é observada devido a interrupção ou retardamento da expansão e a divisão celular, o que causa a diminuição do crescimento das folhas e do caule bem antes do estresse hídrico tornar-se severo a ponto de causar o fechamento dos estômatos e uma diminuição na fotossíntese (Fatima et al., 2019; Duarte, 2012). Baéz et al (2020) observaram que plantas de soja submetidas a déficit hídrico severo apresentaram alturas menores, em relação às plantas tratadas sem déficit de água. Melo et al. (2018), estudando genótipos de milho submetidos

a déficit hídrico, constatarem menor altura de planta comparados aos genótipos cultivados em ambiente sem déficit hídrico.

3.3. Trocas gasosas do milho

Todas as variáveis fisiológicas avaliadas no período que coincidiu com o início do pendoamento da cultura do milho apresentaram efeito isolado significativo para o fator estresse hídrico (Tabela 3), em que é possível observar diferenças na magnitude das variáveis entre os níveis de turnos de rega avaliados (Figura 6).

Tabela 3. Resumo da análise de variância para as variáveis fisiológicas: fotossíntese líquida (A), transpiração (E), condutância estomática (gs), concentração interna de CO₂ (Ci), eficiência instantânea de uso da água (A/E) e eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s), avaliadas na cultura do milho submetido ao estresse hídrico (turnos de rega - TR) e à aplicação de silício no semiárido Alagoano, aos 43 dias após o planto.

FV	GL	Quadrados médios					
		A	E	gs	Ci	A/E	A/g _s
Bloco	3	93,36 ^{ns}	2,84 ^{ns}	0,00 ^{ns}	9.019,41 [*]	0,45 [*]	1.577,57 ^{ns}
Estresse (E)	4	1.759,57 ^{**}	107,39 ^{**}	0,20 ^{**}	10.972,59 ^{**}	3,12 ^{**}	12.272,00 ^{**}
Silício (S)	1	37,59 ^{ns}	0,90 ^{ns}	0,01 ^{ns}	712,25 ^{ns}	0,00 ^{ns}	1.004,30 ^{ns}
E x S	4	53,85 ^{ns}	5,89 ^{ns}	0,00 ^{ns}	766,09 ^{ns}	0,50 ^{ns}	698,17 ^{ns}
CV E (%)		28	29,18	35,08	42,66	13,13	19,47
CV S (%)		19,38	15,78	25,68	40,73	13,75	23,38
Média geral		37,25	9,33	0,32	103,66	3,86	133,59

FV: Fator de variação; GL: Graus de liberdade; CV: Coeficiente de variação; ^{ns}: não significativo; ^{**} e ^{*}: significativo à 1 e 5%, respectivamente, pelo teste de Fisher.

O modelo de regressão que melhor se ajustou aos dados das variáveis fisiológicas foi o linear decrescente, com exceção da A/g_s, em que os dados se ajustaram ao modelo linear ascendente (Figura 6F). A fotossíntese líquida (A) foi afetada negativamente com o aumento dos turnos de rega, onde pode-se observar que o TR de 1 dia proporcionou a obtenção da maior média para a variável, e sua diferença para o tratamento do turno de rega de 13 dias foi de 24,02 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Figura 6A).

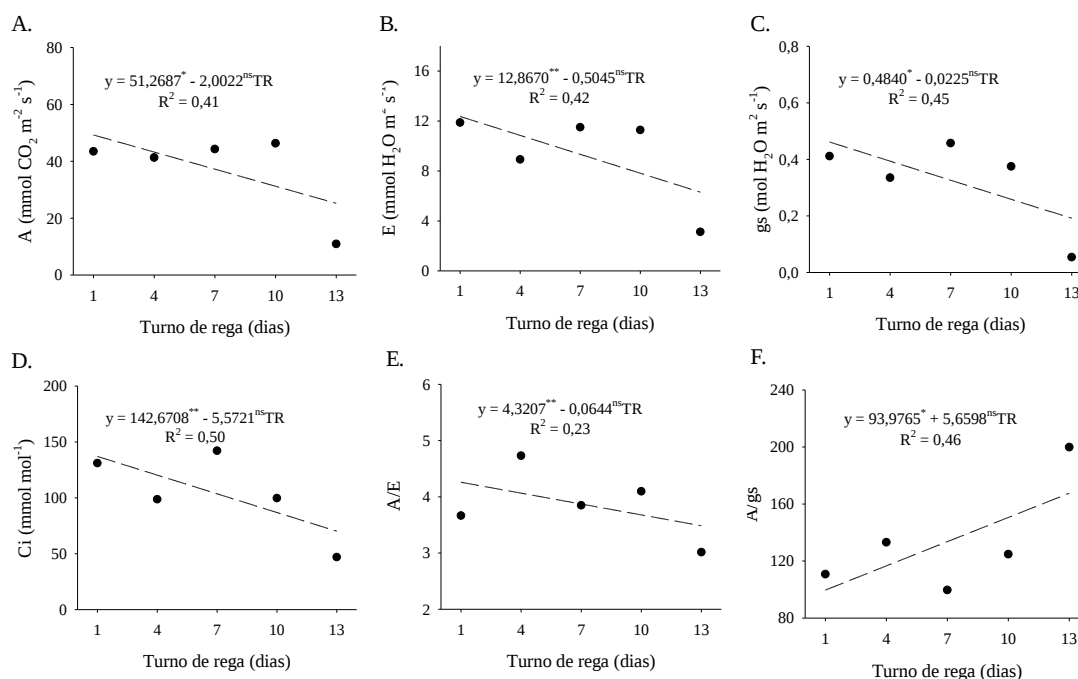


Figura 6. A - Fotossíntese líquida (A), E - transpiração (B), gs - condutância estomática (C), Ci – concentração interna de CO_2 (D), A/E - eficiência instantânea de uso da água (E) e A/gs - eficiência intrínseca do uso da água (F) avaliadas na cultura do milho submetido ao estresse hídrico (turno de rega - TR), em função de turnos de rega no semiárido Alagoano, aos 43 dias após o plantio.

A transpiração (E) decresceu conforme o aumento do déficit hídrico em função dos turnos de rega (Figura 6B), em que o TR de 1 dia apresentou a maior média de transpiração, já que as plantas desse tratamento recebiam mais água. As plantas que receberam água diariamente apresentaram média de $12,36 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, enquanto que as plantas que receberam água a cada 13 dias apresentaram média de $6,3 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

O tratamento que apresentou maior condutância estomática (gs) foi o TR de 1 dia (Figura 6C), com média de $0,46 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, com diferença de $0,27 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para o tratamento de 13 dias de TR. Efeito semelhante ocorreu para a variável de concentração interna de CO_2 (Ci) (Figura 6D), em que o tratamento de 1 dia de TR também apresentou a maior média, sendo $137,09 \mu\text{mol mol}^{-1}$, com diferença de magnitude maior para o TR de 13 dias, que apresentou média de $70,23 \mu\text{mol mol}^{-1}$.

A eficiência instantânea do uso da água (A/E) decresceu conforme o aumento dos turnos de rega (Figura 6E), enquanto que a eficiência intrínseca do uso da água (A/gs)

aumentou (Figura 6F). As plantas irrigadas diariamente apresentaram maior A/E, com média de $4,26 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} / \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, enquanto que as plantas tratadas com o TR de 13 dias tiveram menor desempenho, com média de $3,48 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} / \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. No entanto, as plantas de milho tratadas com o TR de 13 dias apresentaram maior A/gs, com média de $167,55 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} / \text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, enquanto que a menor A/gs foi encontrada nas plantas tratadas com o TR de 1 dia ($99,63 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} / \text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

Com a redução da disponibilidade hídrica, a planta tende a reduzir a transpiração, e consequentemente, a condutância estomática. Essa resposta fisiológica é relevante, pois promove uma diminuição na interface planta/atmosfera, com consequente queda na assimilação fotossintética o que afeta negativamente a produção (Taiz et al., 2017). Possivelmente, o maior valor de eficiência intrínseca do uso da água (A/gs), constatado no TR de 13 dias, resultou do fechamento estomático provocado pelo estresse hídrico e, consequentemente, da inibição da perda de água por transpiração das plantas aumentando, desta forma, a A/gs.

Plantas estressadas por déficit hídrico são afetadas em sua capacidade de realizar troca de gases, exibindo mudanças no crescimento e no rendimento de biomassa (Nilahyane et al., 2020). Laskari et al. (2022) também observaram reduções nos parâmetros de trocas gasosas em plantas de milho submetidas ao estresse hídrico, diminuindo a eficiência fotossintética e o rendimento das mesmas.

3.4. Fitomassa fresca e seca do milho

Houve efeito isolado significativo do fator estresse hídrico para a massa fresca e seca da parte aérea (MFPA e MSPA, nesta ordem) e para a massa fresca da espiga (MFE), enquanto que o fator aplicação de silício influenciou significativamente na MFPA e MSPA. O fator idade das plantas (dias após o plantio) apresentou efeito isolado significativo para todas as variáveis de fitomassa analisadas (Tabela 4).

Tabela 4. Resumo da análise de variância para as variáveis: matéria fresca e seca da parte aérea (MFPA e MSPA, respectivamente) e matéria fresca e seca da espiga (MFE e MSE, respectivamente), em função dos fatores estresse hídrico (turnos de rega - TR), silício (com e sem aplicação) e idade (dias após o plantio) na cultura do milho cultivado no semiárido Alagoano.

FV	GL	Quadrados médios			
		MFPA	MFE	MSPA	MSE
Bloco	3	18182,71 ^{ns}	7592,81 ^{ns}	155364,66 [*]	3883,54 ^{ns}
Estresse (E)	4	1167250,04 ^{**}	98605,04 [*]	348040,84 ^{**}	31374,07 ^{ns}
Silício (S)	1	434886,08 ^{**}	403,04 ^{ns}	121905,13 ^{**}	676,74 ^{ns}
Idade (I)	7	536542,92 ^{**}	700488,42 ^{**}	493725,4 ^{**}	331820,73 ^{**}
E x S	4	12560,47 [*]	53506,74 ^{**}	13480,2 ^{**}	19028,71 ^{**}
E x I	28	5229,26 ^{ns}	4709,21 ^{**}	372,89 ^{ns}	1621,59 ^{ns}
S x I	7	11881,7 ^{**}	26,8 ^{ns}	3208,6 ^{ns}	552,29 ^{ns}
CV E (%)		51,76	75,89	65,55	79,52
CV S (%)		13,58	22,08	20,84	26,8
Média geral		500,62	214,36	314,82	145,94

FV: Fator de variação; GL: Graus de liberdade; ^{ns}: não significativo; ^{**} e ^{*}: significativo à 1 e 5%, respectivamente, pelo teste de Fisher.

Ainda de acordo com a análise de variância, houve efeito significativo na interação dos fatores estresse e silício sobre todas as variáveis de fitomassa avaliadas, enquanto que para a interação entre estresse e idade apenas para MFE. Já para a interação entre silício e idade das plantas houve influência significativa apenas para a variável MFPA (Tabela 4).

Observa-se resposta de redução linear para a matéria fresca da parte aérea (MFPA) das plantas tratadas com e sem a aplicação de Si em função dos TR, em que a maior MFPA das plantas tratadas com Si (706,4 g planta⁻¹) foi obtida com 1 dia de turno de rega (Figura

7A). Observa-se que a máxima MFPA obtida pelas plantas sem aplicação de Si foi de 629,3 g planta⁻¹ obtida com a aplicação de 1 TR e a menor foi de 298,26 g planta⁻¹ obtida com 13 TR. O desdobramento dos turnos de rega dentro da aplicação ou não de silício (Figura 7A) evidenciou diferença significativa para a aplicação de silício apenas no tratamento com 1 TR. Para os demais turnos de rega (4, 7, 10 e 13) não se constatou diferença entre a aplicação ou não de silício nas plantas.

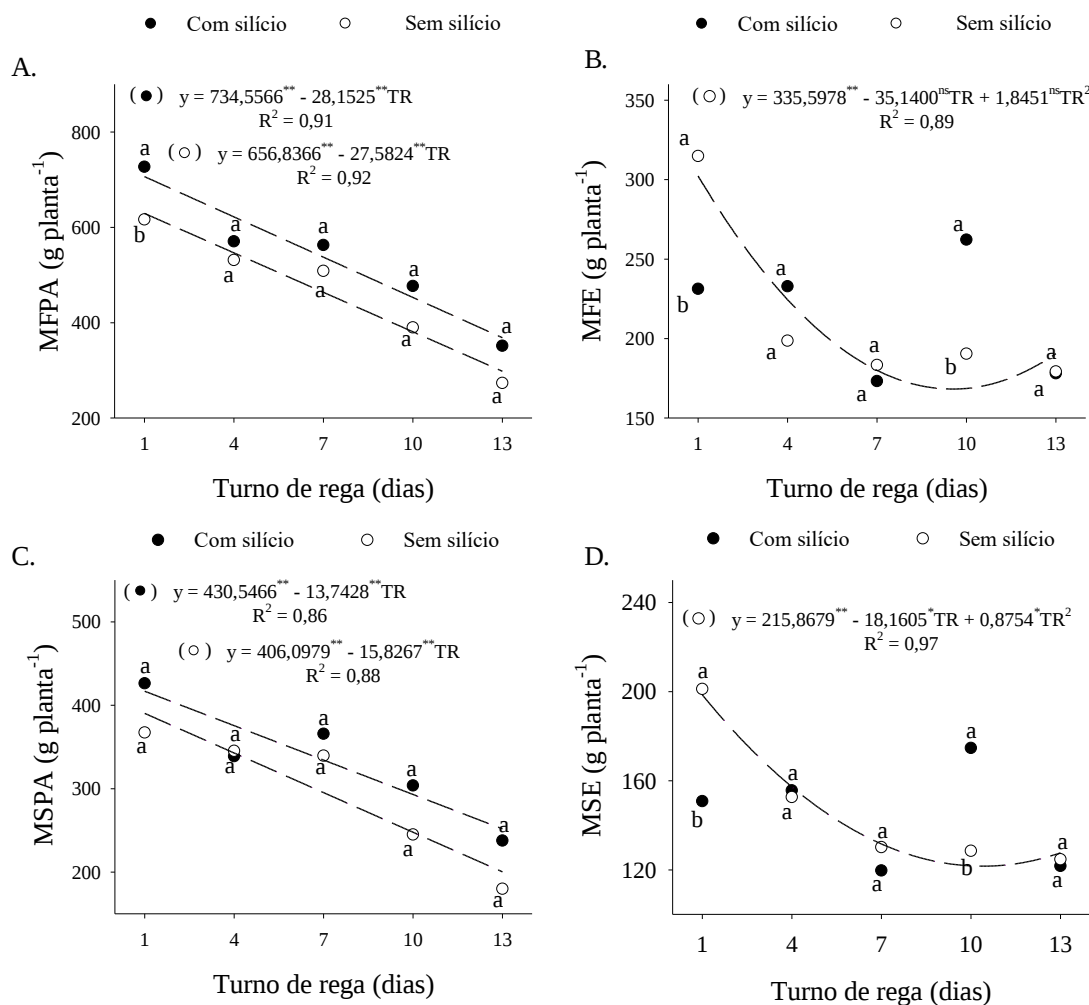


Figura 7. Desdobramento da interação entre os fatores estresse hídrico (turnos de rega - TR) e aplicação de silício (com e sem Si) sobre a matéria fresca e seca da parte aérea (A e C, respectivamente) e a matéria fresca e seca da espiga (B e D, nesta ordem) na cultura do milho cultivado no semiárido Alagoano.

Houve redução linear da matéria seca da parte aérea (MSPA) das plantas tratadas com e sem a aplicação de Si em função dos TR, em que a maior MSPA das plantas tratadas com Si (416,8 g planta⁻¹) foi obtida com 1 dia de turno de rega (Figura 7C). Observa-se que a máxima MSPA obtida pelas plantas sem aplicação de Si foi de 390,27 g planta⁻¹

obtida com a aplicação de 1 TR e a menor foi de 200,35 g planta⁻¹ obtida com 13 TR. O desdobramento dos turnos de rega dentro da aplicação ou não de silício (Figura 7C) não evidenciou diferença significativa para a aplicação de silício em nenhum dos tratamentos de TR.

Em relação à matéria fresca (MFE) e seca (MSE) da espiga (Figuras 7B e 7D, nesta ordem), observa-se grande variação nas médias das plantas tratadas com a aplicação de Si. Nenhum modelo de regressão se ajustou aos dados, não sendo possível explicar matematicamente o comportamento biológico das plantas em função destes tratamentos. Em contrapartida, para as plantas tratadas com os turnos de rega sem a aplicação de Si, a MFE e MSE apresentaram resposta quadrática, com as máximas de 302,3 e 198,6 g planta⁻¹ com 1 TR, respectivamente, e mínimas de 168,28 e 121,68 g planta⁻¹ aos 9,5 e 10,4 TR, na devida ordem.

A limitação hídrica diminui o rendimento de biomassa em plantas de milho cultivadas em região semiárida, pela consequente diminuição do crescimento (Nilahyane et al., 2020). Ahmad et al., (2020a) observaram que o aumento do nível de estresse por déficit hídrico reduziu os parâmetros morfológicos, como peso da biomassa fresca e seca das plantas de trigo. Ahmad et al (2020b) estudando híbridos de milho, constataram que o acúmulo de matéria seca é menor em plantas sob condições de restrição hídrica. Crosa et al. (2021) também observaram que a restrição hídrica diminui a MSPA em plantas de milho.

Observa-se resposta logística da MFPA em função da interação entre a aplicação de silício e a idade das plantas com máximo acúmulo aos 135 DAP (Figura 8A), em que as plantas que receberam a aplicação de Si apresentaram acúmulo máximo de 591,2 g planta⁻¹. Já as plantas tratadas sem a aplicação de Si apresentaram maior acúmulo de MFPA de 503,3 g planta⁻¹. A análise de desdobramento dos níveis de aplicação de Si dentro dos níveis de idade das plantas (DAP) evidenciaram que não houve diferença significativa entre a aplicação e a não aplicação de Si dentro das idades das plantas (Figura 8A).

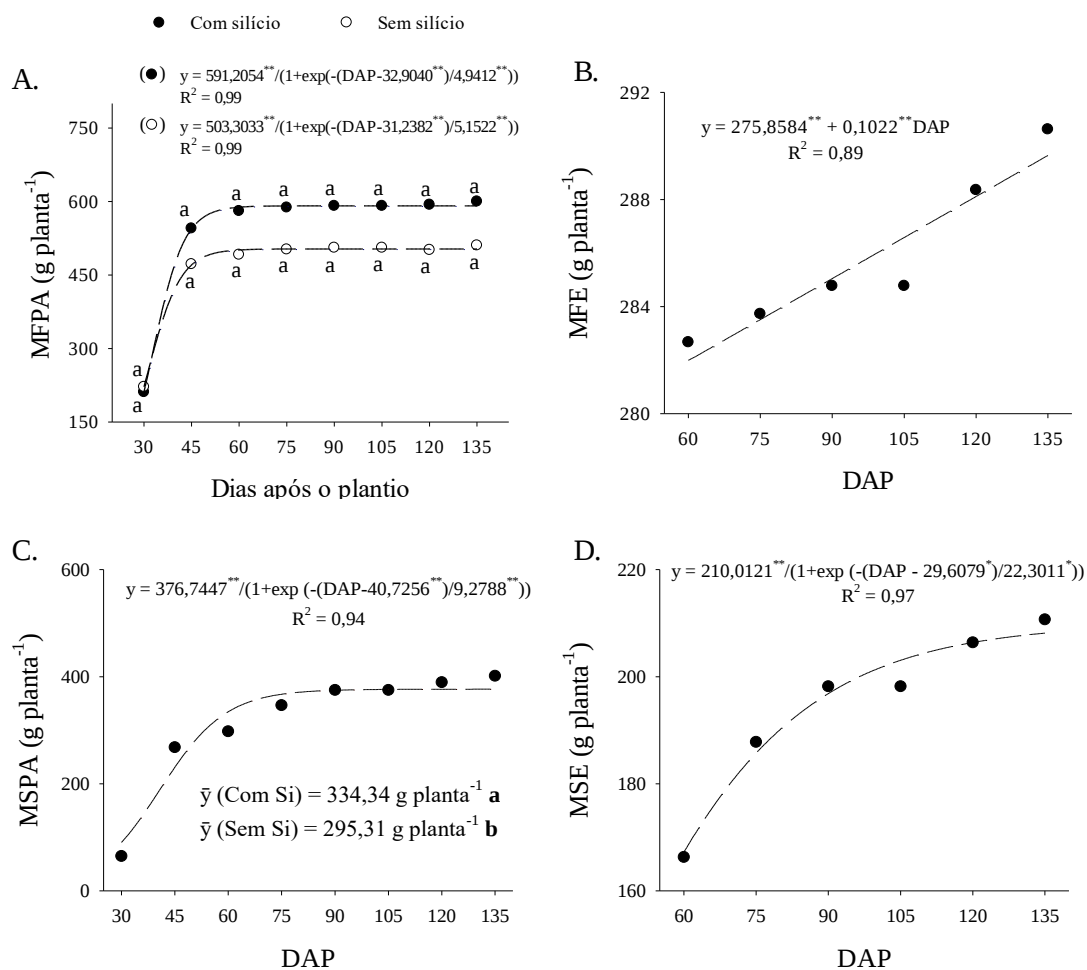


Figura 8. Desdobramento da interação dos fatores aplicação de Si e idade das plantas (dias após o plantio - DAP) sobre a matéria fresca da parte aérea (A), efeito isolado da idade das plantas sobre a matéria fresca e seca da espiga (B e D) e efeito isolado dos fatores aplicação de Si e idade das plantas sobre a matéria seca da parte aérea (C) na cultura do milho cultivado no semiárido Alagoano.

A MFE apresentou resposta linear crescente em função da idade das plantas (Figura 8B), com máximo acúmulo aos 135 DAP (289,65 g planta⁻¹). Para a variável de MSPA, observa-se resposta logística em função da idade das plantas (Figura 8C), com maior acúmulo de 376,7 g planta⁻¹ aos 135 DAP. O teste de comparação de médias evidenciou diferença significativa ($p < 0,05$) para MSPA entre as plantas tratadas com e sem aplicação de Si (Figura 8C), com acréscimo de 13,21% nas plantas tratadas com Si. Observa-se resposta logística da MSE em função da idade das plantas (Figura 8D), com acúmulo máximo de 208,16 g planta⁻¹.

Ahmad et al. (2020a) estudando níveis de estresse hídrico e o uso de Si na cultura do trigo, constataram que a aplicação de Si aumentou a tolerância à seca aumentando os índices morfológicos, representados pela biomassa fresca e seca da cultura estudada.

A MFE apresentou comportamento distinto entre os tratamentos de estresse hídrico ao longo dos dias após o plantio (DAP) (Figura 9). As maiores médias de MFE foram para as plantas de milho tratadas com 1 dia de TR (E1), seguido pelas médias do tratamento de 10 dias de TR (E4). Os tratamentos de 7 e 13 dias de TR (E3 e E5, respectivamente) apresentaram as menores médias de MFE em todas as avaliações realizadas ao longo dos DAP. A maior MFE do tratamento E1 foi aos 135 DAP, pelo acúmulo médio de 365,9 g planta⁻¹, enquanto que para os tratamentos E3 e E5 foram observadas médias de 240,7 e 244,1 g planta⁻¹, respectivamente, no mesmo período.

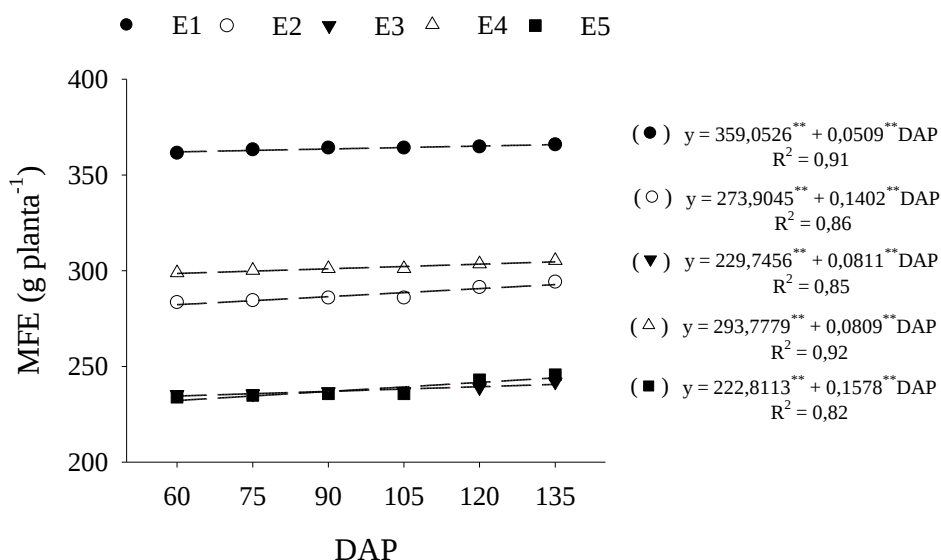


Figura 9. Desdobramento da interação entre os fatores idade da planta (DAP) e estresse hídrico (turnos de rega - TR) sobre a matéria fresca da espiga na cultura do milho cultivado no semiárido Alagoano (os níveis de estresse hídrico E1, E2, E3, E4 e E5 correspondem aos TR de 1, 4, 7, 10 e 13 dias, respectivamente).

Um decréscimo na disponibilidade de água gera efeito deletério no crescimento, pois uma maneira de compensar um decréscimo no potencial hídrico é pelo fechamento dos estômatos, que reduz a perda de água por transpiração. No entanto, o fechamento estomático também diminui a absorção de CO₂ pela folha, reduzindo, assim, a fotossíntese e reprimindo o crescimento pela redução do acúmulo de biomassa (Taiz et al., 2021).

Diversos estudos experimentais mostram em seus resultados que a limitação da disponibilidade hídrica gera diminuição no crescimento e rendimento de culturas agrícolas, pela consequente redução nos processos bioquímicos alimentados pelos produtos da fotossíntese, o que reduz a produção e acúmulo de biomassa pelas plantas (Nilahyane et al., 2020; Ahmad et al., 2020a; 2020b; Crosa et al., 2021).

4. CONCLUSÕES

O estresse hídrico afetou negativamente as trocas gasosas e o acúmulo de biomassa na cultura do milho.

A fertilização com silício atenuou os efeitos deletérios do estresse hídrico sobre o diâmetro do colmo, o índice de área foliar e a matéria fresca e seca da parte aérea.

O uso do silício como atenuante de estresse hídrico é viável, sobretudo em regiões semiáridas, onde se pratica a agricultura de sequeiro.

É necessário a realização de mais estudos sobre o efeito da aplicação do silício no cultivo de milho na região, principalmente no que se refere às respostas fisiológicas da cultura em diferentes épocas de avaliação.

5. REFERÊNCIAS

- AHMAD, M. I.; SHAH, A. N.; SUN, J.; SONG, Y. Comparative study on leaf gas exchange, growth, grain yield, and water use efficiency under irrigation regimes for two maize hybrids. **Agriculture**, v. 10, n. 9, p. 369, 2020b. <https://doi.org/10.3390/agriculture10090369>.
- AHMAD, Z.; WARAICH, E. A.; BARUTÇULAR, C.; HOSSAIN, A.; ERMAN, M.; ÇİĞ, F.; GHARIB, H. S.; SABAGH, A. E. Enhancing Drought Tolerance in Wheat through Improving MorphoPhysiological and Antioxidants Activities of Plants by the Supplementation of Foliar Silicon. **Phyton-International Journal of Experimental Botany**, v. 89, p. 529–539, 2020a.
- ALMEIDA, L. G.; MAGALHÃES, P. C.; KARAM, D.; SILVA, E. M.; ALVARENGA, A. A. Chitosan application in the induction of water deficit tolerance in maize plants. **Agronomy**, v. 42, e42463, 2020. DOI: 10.4025/actasciagron.v42i1.4246
- ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; GOMES, F. T.; SILVA, M. J.; JARDIM, A. M. F. R.; SIMÕES, V. J. L. P.; IZIDRO, J. L. P. S.; LEITE, M. L. M. V.; TEIXEIRA, V. I.; SILVA, T. G. F. Estresse hídrico em plantas forrageiras: Uma revisão. **PUBVET**, v. 13, n. 1, p. 1-10, 2019.
- BADAWY, S. A.; ZAYED, B. A.; BASSIOUNI, S. M. A.; MAHDI, A. H. A.; MAJRASHI, A.; ALI, E. F.; SELEIMAN, M. F. Influence of Nano Silicon and Nano Selenium on Root Characters, Growth, Ion Selectivity, Yield, and Yield Components of Rice (*Oryza sativa* L.) under Salinity Conditions. **Plants**, v. 10, n. 8, p. 1657, 2021. <https://doi.org/10.3390/plants10081657>.
- BÁEZ, M. S. A.; PETRY, M. T.; CARLESSO, R.; BASSO, L. J.; ROCHA, M. R.; & RODRIGUEZ, G. J. Balanço hídrico e produtividade da soja cultivada sob diferentes níveis de déficit hídrico no Sul do Brasil. **Investigación Agraria**, v. 22, n. 1, p. 3-12, 2020. <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2020.junio.03-12>
- BUKHARI, M. A.; AHMAD, Z.; ASHRAF, M. Y.; AFZAL, M.; NAWAZ, F.; NAFEEES, M.; JATOI, W. N.; MALGHANI, N. A.; SHAH, A. N.; MANAN, A. Silicon mitigates drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) through improving photosynthetic pigments, biochemical and yield characters. **Silicon**, v. 13, p. 4757–4772, 2021.
- CALICIOGLU, O.; FLAMMINI, A.; BRACCO, S.; BELLÙ, L.; SIMS, R. The future challenges of food and agriculture: an integrated analysis of trends and solutions. **Sustainability**, v. 11, n. 1, p. 1-21, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11010222>
- CAMPOS, A. J. M.; SANTOS, S. M.; NACARATH; I. R. F. F. Estresse hídrico em plantas: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 10, e311101523155, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i15.23155>
- CASSEL, J. L.; GYSI, T.; ROTHER, G. M.; PIMENTA, B. D.; LUDWIG, R. L.; SANTOS, D. B. Benefícios da aplicação de silício em plantas. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 4, n. 4, p. 6601-6615, 2021. DOI: 10.34188/bjaerv4n4-140

- CORREA, R. S. B.; MORAES, J. C.; AUAD, A. M.; CARVALHO, G. A. Silicon and acibenzolar-s-methyl as resistancenducers in cucumber, against the Whitefly Bemisia tabaci (Gennadius) (Hemiptera: Aleyrodidae) biotype B. **Neotropical Entomology**, v. 34, n. 3, p. 429-433, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S1519-566X2005000300011>
- CROSA, C. F. R.; ORTIZ, A. C.; FELIPEZ, W. Germinação e desenvolvimento de sementes de dois híbridos de milho sob estresse hídrico. **Revista Científica Rural**, v. 23, n. 1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.30945/rcr-v23i1.3245>.
- DUARTE, A. L. M. Efeito da água sobre o crescimento e o valor nutritivo das plantas forrageiras. *Pesquisa & Tecnologia*, v. 9, n. 2, p. 1-6, 2012.
- EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. 2ª ed. Londrina: Editora Planta, 2006. 403 p.
- FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Milho: Ecofisiologia e rendimento. Tecnologia da produção de milho**. Piracicaba: ESALQ-Departamento de Agricultura, 1997. 410 p.
- FATIMA, R. T.; JESUS, E. G.; GUERRERO, A. C.; ROCHA, J. L. A.; BRITO, M. E. B. Adubação silicatada como atenuante do estresse hídrico no crescimento e trocas gasosas da alface. **Engenharia na Agricultura**, v. 27, n. 2, p. 170-178, 2019. DOI: 10.13083/reveng.v27i2.892
- FERREIRA, D. F. SISVAR: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Revista Brasileira de Biometria*, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019. <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>.
- FORNASIERI FILHO, D. **Manual da cultura do milho**. Jaboticabal: Funep, 2007. 576 p.
- FREITAS, C. D. M.; PAMPLONA, J. P.; LINS, H. A.; SOUZA, M. F.; DOMBROSKI, J. L. D.; SILVA, D. V. Gaseous exchanges of corn and weeds under competition and water regimes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 7, p. 465-473, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n7p465-473>
- GARDNER, F. P.; PCOBCE, R. B.; AND MITCHELL, R. L. **Physiology of Crop Plants**. 2 ed. Jodhpur: Scientific Publishers, 2010. 327 p.
- GAUR, S.; KUMAR, J.; KUMAR, D.; CHAUHAN, D. K.; PRASAD, S. M.; SRIVASTAVA, P. K. Fascinating impact of silicon and silicon transporters in plants: A review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 202, p. 110885, 2020. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.110885.
- GILMORE, E.; ROGERS, J. S. Heat units in a method of measuring maturity in corn. **Agronomy Journal**, v. 50, n.10, p. 611-615, 1958.
- HERMANN, E. R.; CÂMARA, G. M. S. Um método simples para estimar a área foliar de cana-de-açúcar. **Revista da STAB**, v. 17, n. 1, p. 32-34, 1999.

- LASKARI, M.; MENEXES, G.; KALFAS, I.; GATZOLIS, I.; DORDAS, C. Water stress effects on the morphological, physiological, characteristics of maize (*Zea Mays* L.) and on environment cost. *Agronomy*, v. 12, n. 10, p. 1-17. 2022. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102386>
- LEHNINGER N. D. **Principios de bioquímica**. 4ª ed. São Paulo: Sarvier, 2006.1202 p.
- MA, J. F.; YAMAJI, N. Functions and transport of silicon in plants. **Cellular and Molecular Life Sciences**, v. 65, n. 19, p. 3049-3057, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00018-008-7580-x>
- MELO, A. V.; SANTOS, V. M.; VARANDA, M. A. F.; CARDOSO, D. P.; DIAS, M. A. R. Desempenho agrônômico de genótipos de milho submetidos ao déficit hídrico no sul do estado do tocantins. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 17, n. 2, p. 177-189, 2018. DOI: <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v17n2p177-189>
- NERI, D. K. P.; GOMES, F. B.; MORAES, J. C.; GÓES, G.B; Marrocos, S. T. P. Influência do silício na suscetibilidade de *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) ao inseticida lufenuron e no desenvolvimento de plantas de milho. **Ciência Rural**, v. 39, n. 6, p. 1633-1638, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782009005000111>
- NILAHYANE, A.; ISLAM, M. A.; MESBAH, A. O.; HERBERT, S. K.; GARCIA Y GARCIA, A. Growth, water productivity, nutritive value, and physiology responses of silage corn to water stress. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 3, p. 1625-1635, 2020.
- REA, R. S.; ISLAM, M. R.; RAHMAN, M. M.; NATH, B.; MIX, K. Growth, nutrient accumulation, and drought tolerance in crop plants with silicon application: A Review. **Sustainability**, v. 14, n. 8, p. 4525, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14084525>
- ROCHA, D. S.; RODRIGUES, C. S.; GALLO, P. B.; TICELLI, M.; PATERNIANI, M. E. A. G. Z. Drought tolerance in intervarietal maize hybrids. **Revista Caatinga**, v. 34, n. 1, p. 80 –89, 2021. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252021v34n109rc>
- SILVA, S.; CORREIA, A. A.; SILVA, C. S.; SILVA, G. F.; ARAÚJO, E. R.; SÁ, D. A.; DAMASCENO, F. F.; SILVA, A. A. F. Water stress in different phenological phases of corn and growth responses. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 21, n. 11, p. 20998–21011, 2023. <https://doi.org/10.55905/oelv21n11-132>
- SILVA, S.; SOUSA, A. C. P.; SILVA, C. S.; ARAÚJO, E. R.; SOARES, M. A. DA S.; TEODORO, I. Parâmetros produtivos do milho sob déficit hídrico em diferentes fases fenológicas no semiárido brasileiro. **Irriga**, Edição Especial – Nordeste, v. 1, n. 1, p. 30-41, 2021.
- SOUMYA, K.; GIRIJESH, G. K.; VEERANNA, H. K.; DUSHYANTHKUMAR, B. M.; AND SARVAJNA, B. S. Effect of Nano Zinc and Silicon on Crop Growth and Yield of Rice (*Oryza sativa* L.). **International Journal of Current Microbiology and Applied Science**, v. 9, n. 10, p. 1112-1120, 2020. DOI: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.910.133>

- SUBAEDAH, ST.; EDY, E.; MARIANA, K. Growth, yield, and sugar content of different varieties of sweet corn and harvest time. **International Journal of Agronomy**, v. 2021, p. 7, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/8882140>
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5ª ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 954p.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fundamentos de fisiologia**. 1ª ed. Porto Alegre: Artmed, 2021. 656 p.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MULLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia vegetal**. 6ª ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 918 p.
- TEIXEIRA, G. C. M.; ROCHA, A. M. S.; OLIVEIRA, K. S.; SARAH, M. M. S.; OLIVEIRA FILHO, A. S. B.; PRADO, R. M.; PALARETTI, L. F. Silício na mitigação dos estresses por deficiência de manganês e pelo déficit hídrico em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar (Revisão Bibliográfica). **Científica**, v. 48, n. 2, p. 170-187, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.15361/1984-5529.2020v48n2p170-187>
- YANG, F.; CEN, R.; FENG, W.; LIU, J.; QU, Z.; MIAO, Q. Effects of super-absorbent polymer on soil remediation and crop growth in arid and semi-arid areas. **Sustainability**, v. 12, n. 18, p. 7825, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12187825>

-----CAPÍTULO III-----

**EFEITO DA APLICAÇÃO FOLIAR DE SILÍCIO SOBRE A EXTRAÇÃO E A
EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES PELO MILHO SOB ESTRESSE HÍDRICO**

CAPÍTULO III - EFEITO DA APLICAÇÃO FOLIAR DE SILÍCIO SOBRE A EXTRAÇÃO E A EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES PELO MILHO SOB ESTRESSE HÍDRICO

Resumo: O silício (Si) desempenha papel importante na produtividade das plantas, melhorando as deficiências nutricionais e em várias situações atenuando os efeitos adversos de fatores bióticos e abióticos. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito atenuante do Si sobre a extração e a exportação de nutrientes por plantas de milho tratadas com diferentes níveis de déficit hídrico. O delineamento experimental adotado no experimento foi em faixas com quatro repetições esquematizadas em parcelas subdivididas, em que as parcelas foram tratadas com os níveis de estresse hídrico (1, 4, 7, 10 e 13 dias de turno de rega), e as subparcelas tratadas com a aplicação ou não aplicação de silicato de potássio. Aos 135 DAP, foram coletadas em cada subparcela uma planta para análise nutricional. Foram determinadas as concentrações dos nutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), ferro (Fe), cobre (Cu), manganês (Mn) e zinco (Zn), além do Si. Os acúmulos dos nutrientes foram determinados pelo produto da matéria seca e das concentrações de nutrientes da parte aérea e da espiga, enquanto que as exportações, pelo produto da matéria seca e das concentrações de nutrientes encontrados na espiga. O aumento dos níveis de estresse hídrico diminuiu o acúmulo dos nutrientes N, Ca, Fe, Mn, Zn e Si, mas o acúmulo de K aumentou. As plantas tratadas com a aplicação de Si acumularam mais nutrientes em relação às plantas tratadas sem Si. A aplicação de Si proporcionou maior extração e exportação de nutrientes pelo milho em condições de estresse ambiental.

Palavras-chave: Estresse abiótico, déficit hídrico, desordem nutricional, Silicato

EFFECT OF SILICON LEAF APPLICATION ON THE EXTRACTION AND EXPORTATION OF NUTRIENTS BY CORN UNDER WATER STRESS

Abstract: Silicon (Si) plays an important role in plant productivity, improving nutritional deficiencies and in various situations mitigating the adverse effects of biotic and abiotic factors. The objective of this study was to evaluate the mitigating effect of Si on the extraction and export of nutrients by corn plants treated with different levels of water deficit. The experimental design adopted in the experiment was in strips with four replications schematized in subdivided plots, in which the plots were treated with the levels of water stress (1, 4, 7, 10 and 13 days of irrigation intervals), and the subplots treated with the application or not of potassium silicate. At 135 DAP, a plant was collected in each subplot for nutritional analysis. The concentrations of the nutrients nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), sulfur (S), iron (Fe), copper (Cu), manganese (Mn) and zinc (Zn) were determined, in addition to Si. The accumulations of nutrients were determined by the product of dry matter and the nutrient contents of the aerial part and the ear, while exports by the product of dry matter and the levels of nutrients found in the ear. The increase in water stress levels decreased the accumulation of nutrients N, Ca, Fe, Mn, Zn and Si, but the accumulation of K increased. Plants treated with the application of Si accumulated more nutrients compared to plants treated without Si. The application of Si provided greater extraction and export of nutrients by corn in conditions of environmental stress.

Key words: Abiotic stress, water deficit, nutritional disorders, silicate

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas vêm aumentando a frequência e o grau das secas em diversas regiões do globo. A escassez de água afeta seriamente o crescimento e o desenvolvimento das plantas e é considerada restrição severa à produtividade agrícola. A morfologia, a atividade fotossintética, o sistema enzimático antioxidante e os níveis hormonais das plantas podem mudar em resposta ao estresse hídrico (Wu et al., 2022).

O uso de tecnologias que auxiliam na mitigação de estresse hídrico nas culturas tem sido muito estudado, e neste sentido, a fertilização com silício é bastante promissora. Muitos resultados experimentais têm demonstrado o efeito do silício como atenuador de estresses ambientais em plantas, principalmente espécies acumuladoras do elemento, e a obtenção de muitos resultados positivos têm aumentado o interesse do uso do silício como um nutriente na agricultura sustentável na última década (Kovács, Kutasy e Csajbók, 2022).

Durante a última década, muito esforço tem sido direcionado para vincular os efeitos positivos do silício sob deficiência de nutrientes ou toxicidade de metais pesados. Esses estudos destacam o efeito positivo do elemento na produção de biomassa, mantendo a estrutura fotossintética, diminuindo a taxa de transpiração e a condutância estomática e regulando a captação pela raiz para acelerar a translocação de nutrientes, bem como reduzir o estresse oxidativo (Ali et al., 2020).

O silício possui potencial para diminuir os danos causados por desordens nutricionais, onde tem sido verificado que a aplicação do elemento tem atenuado os sintomas por aumentar a absorção e melhorar a redistribuição de nutrientes, melhorar a eficiência de uso de micronutrientes, como o Mn (Oliveira et al., 2019a), Fe e Zn (Mahmoud et al., 2023), a produtividade de plantas da família Poaceae, como milho e sorgo na deficiência de Mn (Oliveira et al., 2020) e aumentar a eficiência nutricional e a produtividade no arroz (Jinger et al., 2022).

O silício é absorvido pela planta na forma de ácido monossilícico e é acumulado nas paredes das células formando uma dupla camada, chamada de cutícula-sílica. Os efeitos benéficos do elemento estão relacionados a melhoria na quantidade e na eficiência do acúmulo de nutriente em diferentes partes das plantas e ao fortalecimento resultante da rigidez das células vegetais (Chaiwong et al., 2022).

Assim, objetivou-se com o presente estudo avaliar o efeito da aplicação de Si sobre a extração e a exportação de nutrientes por plantas de milho tratadas com diferentes níveis de déficit no semiárido Alagoano.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Determinação da matéria seca

Aos 135 dias após o plantio (DAP), foram coletados e separados a parte aérea e os frutos (espigas) de uma planta por subparcela (uma das linhas da área útil) visando-se a determinação da matéria seca no período e o acúmulo e exportação dos nutrientes nitrogênio (N) fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), ferro (Fe), cobre (Cu), manganês (Mn) e zinco (Zn), além do silício (Si) em cada uma das partes.

As plantas coletadas foram separadas em parte aérea (composta pelo pendão, caule, folhas) e frutos (espigas). Posteriormente, todo o material vegetal foi lavado em água corrente e, posteriormente em água deionizada, sendo em seguida, colocados em estufa a 65° C até a obtenção de peso constante. Após a secagem, os materiais foram processados em moinho tipo Willey, com peneira de 2 mm, e armazenadas para posterior quantificação das concentrações dos nutrientes.

2.2. Extração e exportação de nutrientes

Para a determinação de N foi empregada a digestão aberta usando como fonte de calor o bloco digestor e mistura de ácido sulfúrico (H_2SO_4), peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e mistura digestora para digerir a matéria seca, e para os demais nutrientes P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Mn e Zn a digestão foi realizada em sistema fechado usando forno micro-ondas como fonte de calor e ácido nítrico (HNO_3) concentrado para digerir a matéria seca, conforme Silva (2009).

A quantificação de N total foi realizada pelo método de arraste de vapor Kjeldahl; K pelo método de fotometria de chama; P pelo método colorimétrico molibdo-vanadato; S pelo método turbidimétrico do sulfato de bário (Silva, 2009) e, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn e Zn

foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica (Bezerra Neto e Barreto, 2011). A determinação de Si foi realizada em laboratório comercial.

A extração de nutrientes em cada uma das partes da planta (parte aérea e espigas) foi obtida multiplicando-se o teor dos nutrientes obtidos em cada uma das partes pela quantidade de massa de matéria seca acumulada nestas respectivas partes. Por sua vez, a extração total foi determinada por meio do somatório do acúmulo em todas as partes da planta (parte aérea e espigas). Já exportação de nutrientes resultou do acúmulo dos mesmos nas espigas.

1.1. Análises estatísticas

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo teste F ($p < 0,05$ e $p < 0,01$), e havendo significância no fator qualitativo, foram submetidos ao teste de comparação de médias, teste de Tukey ($p < 0,05$), e o fator quantitativo foi submetido à regressão polinomial na análise de variância, decompondo-se os graus de liberdade em componentes de regressão. Para isso foi utilizado o programa estatístico Sisvar versão 5.8 (Ferreira, 2019). A escolha do modelo que melhor se ajustou aos dados foi baseada nos seguintes critérios: no efeito não significativo do desvio de regressão, na significância dos parâmetros da equação de ajuste ($p < 0,05$), no maior valor do coeficiente de determinação (R^2) e na explicação biológica de cada variável em função dos tratamentos avaliados.

2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.1.Extração de nutrientes

Observa-se na Tabela 1 que, à exceção das extrações dos nutrientes P, S, Mg e Cu, todos os demais nutrientes avaliados foram afetados significativamente pelos níveis de estresses hídricos (turnos de rega) analisados. Com relação a aplicação ou não de silício (S), observa-se que, à exceção do Mg, do Cu e do Si, todos os demais nutrientes foram influenciados pela aplicação das doses de silício. Ainda de acordo com a Tabela 1, constata-se que apenas o nutriente Fe foi afetado significativamente pela interação entre os fatores avaliados.

Tabela 1. Resumo da Análise de Variância para extração (parte aérea e espigas) de macronutrientes, micronutrientes e Si em função dos fatores estresse hídrico (E) (turnos de rega - TR) e silício (S) (com e sem aplicação) na parte aérea e na espiga da cultura do milho cultivado no semiárido Alagoano.

FV	GL	Quadrados médios					
		Macronutrientes					
		N	P	K	S	Ca	Mg
Bloco	3	417,70 ^{ns}	26,21 ^{ns}	1.062,02 ^{ns}	45,26 ^{ns}	695,60 ^{ns}	258,36 ^{ns}
Estresse (E)	4	27.985,87*	243,78 ^{ns}	9.576,11**	27,16 ^{ns}	3.538,17**	670,21 ^{ns}
Silício (S)	1	77.005,89**	2.400,17**	7.999,84*	243,69**	8.220,54**	748,05 ^{ns}
E x S	4	9.443,09 ^{ns}	101,60 ^{ns}	3.680,48 ^{ns}	26,85 ^{ns}	1.789,22 ^{ns}	184,8 ^{ns}
CV E (%)		23,37	23,77	21,78	12,96	16,75	17,72
CV S (%)		26,99	18,04	24,32	10,59	15,6	15,14
Média Geral		363,27	44,97	168,12	42,56	167,38	88,81

FV	GL	Micronutrientes				Elemento
		Fe	Cu	Mn	Zn	Si
Bloco	3	51,19 ^{ns}	1,83 ^{ns}	7,63 ^{ns}	84,27*	1909,83**
Estresse (E)	4	344,62**	4,67 ^{ns}	774,06**	287,25**	835,56**
Silício (S)	1	180,49**	0,03 ^{ns}	294,84**	182,45**	1198,8 ^{ns}
E x S	4	45,29*	0,19 ^{ns}	52,06 ^{ns}	30,33 ^{ns}	613,7 ^{ns}
CV E (%)		46,51	126,36	29,24	27,24	33,1
CV S (%)		32,65	70,02	30,98	26,98	46,27
Média Geral		12,09	1,94	15,14	16,88	38,33

FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; CV: Coeficiente de variação; ^{ns}: não significativo; ** e *: significativo à 1 e 5%, respectivamente, pelo teste de Fisher.

As extrações de nitrogênio (N) e de cálcio (Ca) diminuíram em função do aumento nos intervalos de irrigação (Figuras 1A e 1B, respectivamente), enquanto que a extração de

potássio (K) aumentou (Figura 1C). Observa-se na Figura 1A que a máxima extração de N foi observada no tratamento de 1 dia de TR (430,55 kg ha⁻¹), seguido pelo tratamento de 4 dias de TR (396,92 kg ha⁻¹), enquanto que a menor extração de N foi observada no tratamento de 13 dias de TR (296 kg ha⁻¹). A diferença na magnitude entre o menor e o maior nível de estresse foi de 134,56 kg ha⁻¹. Verificou-se, também, que as plantas tratadas com a aplicação de Si apresentaram maior extração do nutriente em comparação às plantas tratadas sem a aplicação do elemento (Figura 1A), registrando-se um aumento percentual de 27,47% do acúmulo de N nas plantas com aplicação de silício em relação às plantas que não receberam aplicação do elemento.

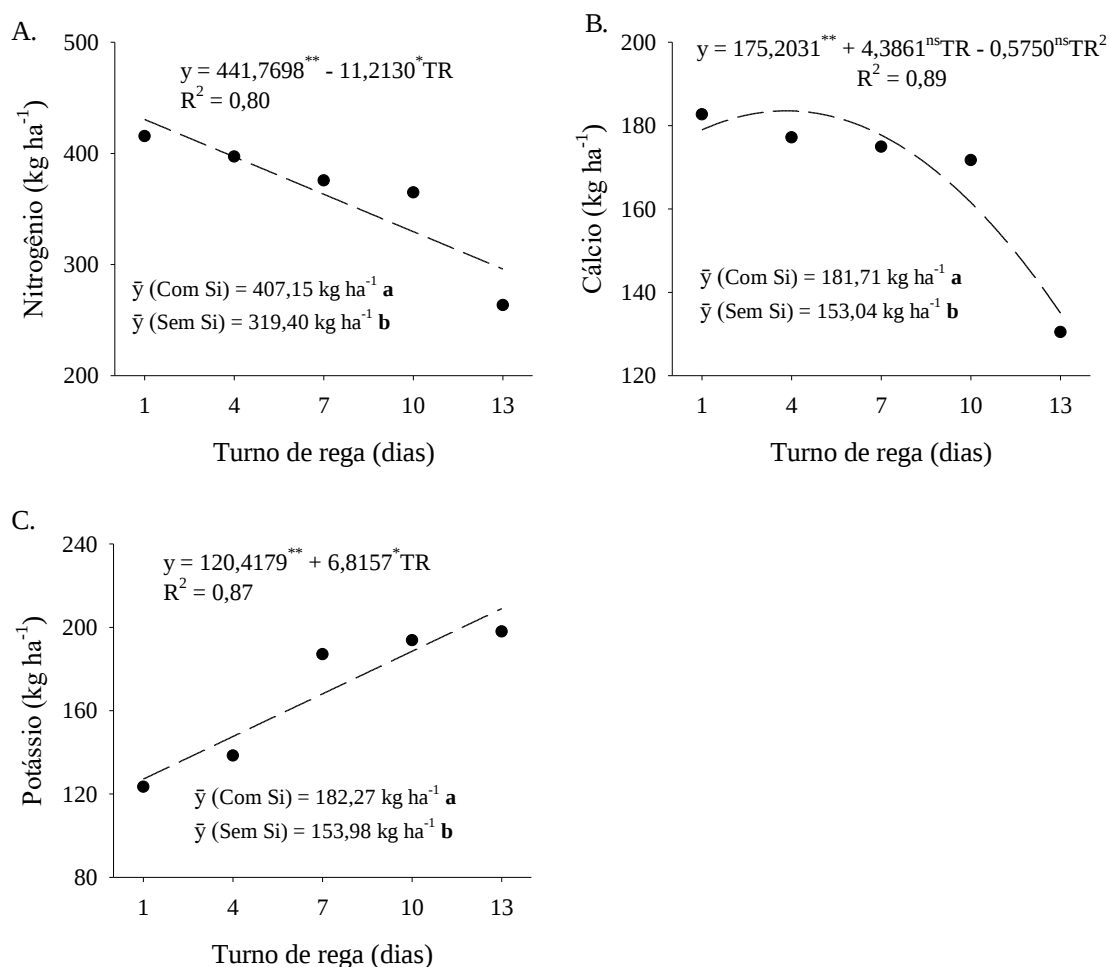


Figura 1. Efeito isolado dos fatores estresse hídrico (turnos de rega - TR) e aplicação de silício (com e sem Si) sobre a extração total (parte aérea e espiga) dos macronutrientes nitrogênio (A), cálcio (B) e potássio (C) pela cultura do milho cultivado no semiárido Alagoano.

O modelo de regressão que melhor se ajustou aos dados de extração de Ca em função dos turnos de rega foi o quadrático crescente (Figura 1B), onde a maior extração do nutriente ($183,56 \text{ kg ha}^{-1}$) foi obtida com 3,81 dias de turnos de rega. Percebe-se, então, que aumentando-se os turnos de rega para valores acima de 3,81 o comportamento das plantas em relação à extração de Ca é reduzido. As plantas tratadas com 13 dias de TR apresentaram a menor média de extração de Ca, sendo apenas 26% menor de que a média máxima. A aplicação de Si proporcionou maior extração de Ca pelas plantas em relação à não aplicação do nutriente, com diferença percentual de 18,73% entre as plantas que receberam a aplicação e as que não receberam a aplicação do elemento.

Os dados referentes a extração de K se ajustaram ao modelo linear crescente (Figura 1C). Observa-se que a máxima extração de K no maior nível de estresse aplicado às plantas (13 dias de TR), com média de 209 kg ha^{-1} , enquanto que o menor acúmulo foi observado no menor nível de estresse (TR de 1 dia), com diferença de $81,79 \text{ kg ha}^{-1}$ entre as médias. As plantas tratadas com TR de 10 dias apresentaram a segunda maior média de extração de K, com diferença de apenas 10,84% em relação à média máxima. A regressão linear ajustada explica 87% da variação no acúmulo de K nas plantas de milho em função dos TR aplicados. A aplicação de Si influenciou positivamente sobre a extração de K nas plantas, que apresentaram maior média em relação às plantas tratadas sem a aplicação do nutriente, com diferença de 28 kg ha^{-1} . Corroborando estes resultados, foi observado por Sousa et al. (2021) maior concentração de K em condições de irrigação com déficit hídrico na cultura do tomate.

Observa-se resposta quadrática para a extração de Fe pelas plantas de milho tratadas com aplicação de Si (Figura 2A), em que a maior extração de Fe pelas plantas foi obtida com 1TR ($27,07 \text{ kg ha}^{-1}$). Já as plantas tratadas sem a aplicação de Si apresentaram resposta linear decrescente, com maior extração de Fe obtida com o TR de 1 dia ($16,6 \text{ kg ha}^{-1}$), e a menor, com 13 dias de TR ($3,3 \text{ kg ha}^{-1}$). O desdobramento dos turnos de rega dentro da aplicação ou não de silício (Figura 2A) evidenciou diferença significativa para a aplicação de silício apenas no tratamento com 1 dia de TR. Para os demais turnos de rega (4, 7, 10 e 13 dias) não se constatou diferença entre a aplicação ou não de silício nas plantas.

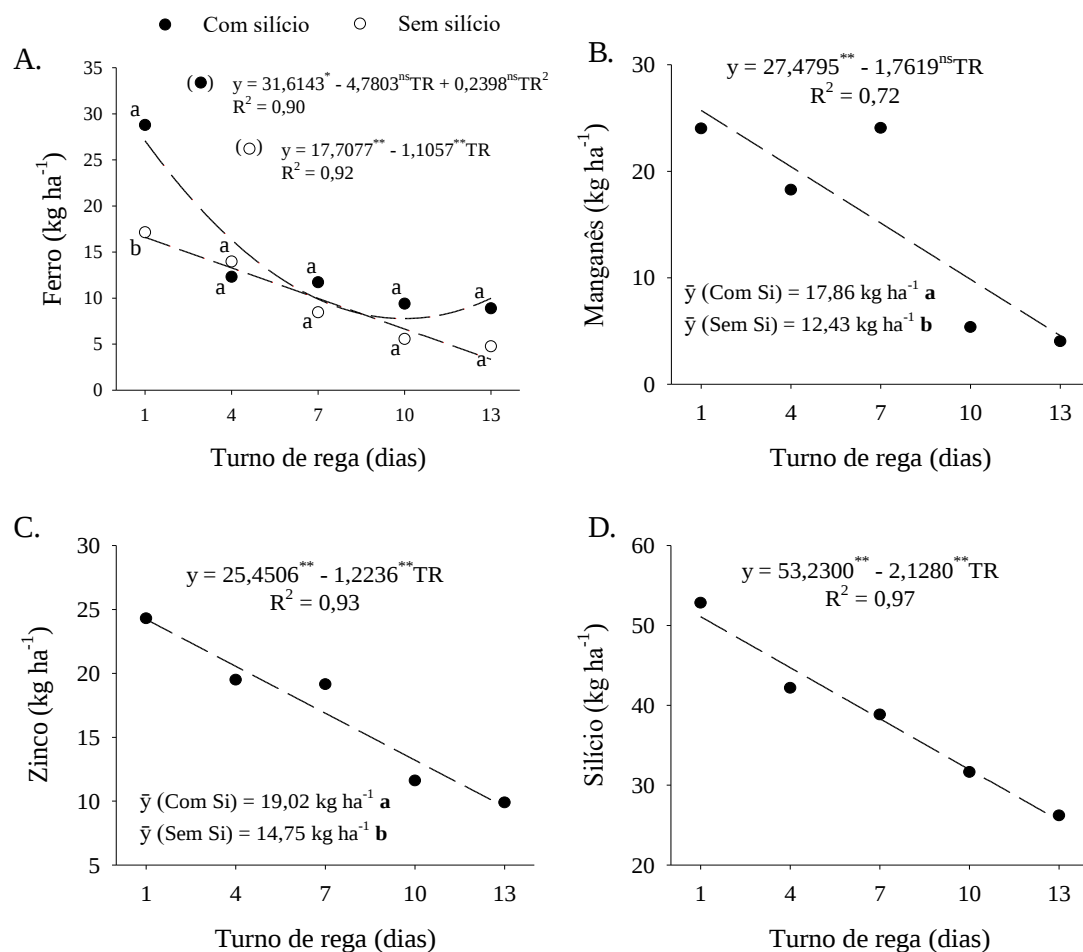


Figura 2. Efeito da interação dos turnos de rega (TR) e aplicação de silício sobre a extração total (parte aérea e espiga) do micronutrientes Ferro (A), e efeito isolado dos turnos de rega e da aplicação de Si sobre a extração total dos micronutrientes Manganês (B) e Zinco (C), e efeito isolado dos turnos de rega sobre a extração do elemento Si (D) pela cultura do milho cultivado no semiárido Alagoano.

A máxima extração de Mn foi observada no TR de 1 dia, com média de 25,72 kg ha⁻¹ (Figura 2B), enquanto que a menor média observada foi no TR de 13 dias, com média de 4,57 kg ha⁻¹. 72% da variação na extração de Mn é explicada pela variação nos TR, como indica o coeficiente de determinação da regressão linear ajustada aos dados observados. Houve efeito significativo da aplicação de Si sobre a extração de Mn pelas plantas de milho, que apresentaram médias maiores em comparação às plantas tratadas sem a aplicação de Si, com diferença de 5,43 kg ha⁻¹, representando um incremento percentual de 43,68% das plantas que receberam sobre as que não receberam aplicação de silício.

A extração de Zn sofreu efeito decrescente com o aumento dos TR (Figura 2C), como mostra a equação de regressão linear, em que se observa que a maior média foi obtida pelo tratamento de 1 dia de TR (24,23 kg ha⁻¹) e a menor média no tratamento de 13 dias de TR, com diferença de 14,68 kg ha⁻¹. Houve diferença significativa entre os tratamentos com e sem aplicação de Si, onde as plantas tratadas com Si apresentaram média 28,95% maior que as plantas tratadas sem Si.

A extração de Si diminuiu com o aumento dos TR (Figura 2D). Observou-se que a maior média de extração de Si foi obtida pelas plantas tratadas com 1 dias de TR (51,1 kg ha⁻¹) e menor média pelas plantas tratadas com 13 dias de TR (25,57 kg ha⁻¹). O menor acúmulo de Si pelas plantas em condições de maior déficit pode ser explicado pelo efeito do nutriente como atenuante de estresse ambiental. Salem, Kenawey e Saudy (2022) verificaram menor acúmulo de Si em tecidos vegetais de trigo sob déficit hídrico. A variação da concentração de Si nas plantas é fortemente influenciada pelo efeito da interação entre os fatores genéticos e ambientais, em que o último está ligado à disponibilidade do Si no solo (Chaiwong et al., 2022).

O déficit hídrico pode afetar as respostas bioquímicas e fisiológicas das plantas, causando desordens nutricionais e alterando o equilíbrio de crescimento em relação à absorção de nutrientes. A absorção de nutrientes é reduzida quando as plantas estão sob condições ambientais de deficiência hídrica (Ghosh, Agrawal e Agrwal, 2020), o que pode diminuir a produção de biomassa, reduzindo a produtividade das culturas.

A disponibilidade de água afeta a dinâmica dos macronutrientes nas diferentes partes das plantas (Covre et al., 2018). Esses mesmos autores constataram maior acúmulo de nutrientes nos frutos e folhas de cafeeiro conilon tratados com irrigação plena. Em estudo com feijão caupi, Oliveira et al. (2019b) observaram que o déficit hídrico afetou o conteúdo de macronutrientes com redução de K, Ca e Mg nos tecidos das plantas. Estudando diferentes níveis de déficit de água em aveia, Coelho et al. (2020) relataram que o déficit reduziu drasticamente o acúmulo de N.

González-Moscoso et al. (2021) constataram aumento na absorção dos macronutrientes N, P e K nas raízes e folhas de tomate com uso de nanopartículas de dióxido de Si. A melhoria da eficiência do uso de N pela aplicação de Si pode resultar de

mudanças no metabolismo primário, estimulando a translocação de aminoácidos da fonte para os tecidos do sumidouro (Detmann et al., 2012; 2013).

Conforme teste de comparação de médias de Tukey ($p < 0,05$) (Tabela 2), verifica-se que houve diferença significativa entre os níveis do fator aplicação de Si. Consta-se que as plantas tratadas com a aplicação de Si apresentaram maiores médias de extração total de fósforo (P) e de enxofre (S) em comparação às plantas tratadas sem a aplicação do elemento, tendo-se as plantas tratadas com Si apresentado, respectivamente, superioridades percentuais de 41,64 e de 12,32% na extração de P e de S em comparação às plantas que não receberam a aplicação do elemento.

Tabela 2. Efeito da aplicação de Si sobre a extração total (parte aérea e espiga) dos macronutrientes fósforo e enxofre pela cultura do milho cultivado no semiárido Alagoano.

Tratamento	Fósforo	Enxofre
	kg ha ⁻¹	
Com Si	52,72 a	45,03 a
Sem Si	37,22 b	40,09 b

Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

De acordo com Marschner (1995), as plantas diferem quanto à absorção de Si, conforme o total de Si absorvido e a quantidade do elemento fornecida por fluxo de massa. Silva e Bohnen (2001) observaram maiores teores de Si em plantas de arroz tratadas com a aplicação do elemento em comparação com as plantas tratadas sem Si.

Plantas em condições de estresse hídrico têm sua capacidade de absorver P diminuída (Karimzadeh, Alikhani e Etesami, 2020). Entretanto, foi observado por Teixeira et al. (2020) que o silício aumentou a concentração de P em cana-de-açúcar sob déficit hídrico. Diferente dos resultados observados neste estudo, Silva e Bohnen (2001) estudando o efeito do Si em arroz não encontraram diferença significativa nos teores de macro e de micronutrientes nas plantas tratadas com e sem Si.

2.2. Exportação de nutrientes

Verifica-se, por meio da Tabela 3, que os níveis de estresse hídrico (E) afetaram significativamente a exportação dos nutrientes cálcio (Ca) e ferro (Fe). Por outro lado, para as duas condições de aplicação de Si (com e sem Si), observa-se diferenças significativas para as exportações dos nutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), enxofre (S),

cálcio (Ca), ferro (Fe), zinco (Zn) e para o elemento silício (Si). Com relação a interação entre os fatores, constata-se diferenças significativas sobre as exportações dos nutrientes fósforo (P) e magnésio (Mg).

Tabela 3. Resumo da Análise de Variância para exportação de macronutrientes, micronutrientes e Si em função dos fatores estresse hídrico (turnos de rega - TR) e silício (com e sem aplicação) pelas espigas de milho cultivado no semiárido Alagoano.

FV	GL	Quadrados médios					
		Macronutrientes					
		N	P	K	S	Ca	Mg
Bloco	3	2.286,29 ^{ns}	81,89 ^{ns}	404,79 ^{ns}	29,20 ^{ns}	78,98 ^{ns}	133,36 ^{ns}
Estresse (E)	4	13.063,39 ^{ns}	135,00 ^{ns}	657,94 ^{ns}	10,00 ^{ns}	729,01 ^{**}	29,27 ^{ns}
Silício (S)	1	27.868,36 [*]	518,47 ^{**}	349,28 ^{ns}	273,26 ^{**}	371,42 ^{**}	0,00 ^{ns}
E x S	4	1.793,97 ^{ns}	104,29 [*]	175,04 ^{ns}	37,98 ^{ns}	11,65 ^{ns}	225,67 [*]
CV E (%)		30,75	24,03	48,59	13,68	28,15	32,7
CV S (%)		30,91	18,64	30,04	11,07	20,99	28,68
Média Geral		242,68	32,3	34,32	35,71	31,34	28,93

FV	GL	Micronutrientes				Elemento
		Fe	Cu	Mn	Zn	Si
Bloco	3	1,30 ^{ns}	0,43 ^{ns}	0,10 ^{ns}	1,26 ^{ns}	10,1 ^{ns}
Estresse (E)	4	13,44 ^{**}	0,46 ^{ns}	0,06 ^{ns}	1,74 ^{ns}	68,22 ^{ns}
Silício (S)	1	8,21 [*]	0,05 ^{ns}	0,01 ^{ns}	8,80 ^{**}	174,59 [*]
E x S	4	1,94 ^{ns}	0,32 ^{ns}	0,17 ^{ns}	1,42 ^{ns}	28,44 ^{ns}
CV E (%)		50,26	149,51	105,42	26,55	79,41
CV S (%)		51,72	86,73	83,34	20,01	64,34
Média Geral		2,68	0,44	0,41	4,34	7,98

FV: Fator de variação; GL: Graus de liberdade; CV: Coeficiente de variação; ^{ns}: não significativo; ^{**} e ^{*}: significativo à 1 e 5%, respectivamente, pelo teste de Fisher.

Observa-se resposta quadrática para exportação de P pelas plantas tratadas com aplicação de Si, onde a maior exportação de P (38,62 kg ha⁻¹) foi obtida com 6 turnos de rega (Figura 3A). Já as plantas tratadas sem a aplicação de Si apresentaram redução linear na exportação de P em função dos TR. A máxima exportação de P obtida pelas plantas sem aplicação de Si foi de 36,91 kg ha⁻¹ obtida com a aplicação de 1TR e a menor exportação foi de 20,50 kg ha⁻¹ obtida com 13TR. O desdobramento dos turnos de rega dentro da aplicação ou não de silício (Figura 3A) evidenciou diferença significativa para a aplicação de silício apenas no tratamento com 10 TR. Para os demais turnos de rega (1, 4, 7 e 13) não se constatou diferença entre a aplicação ou não de silício nas plantas.

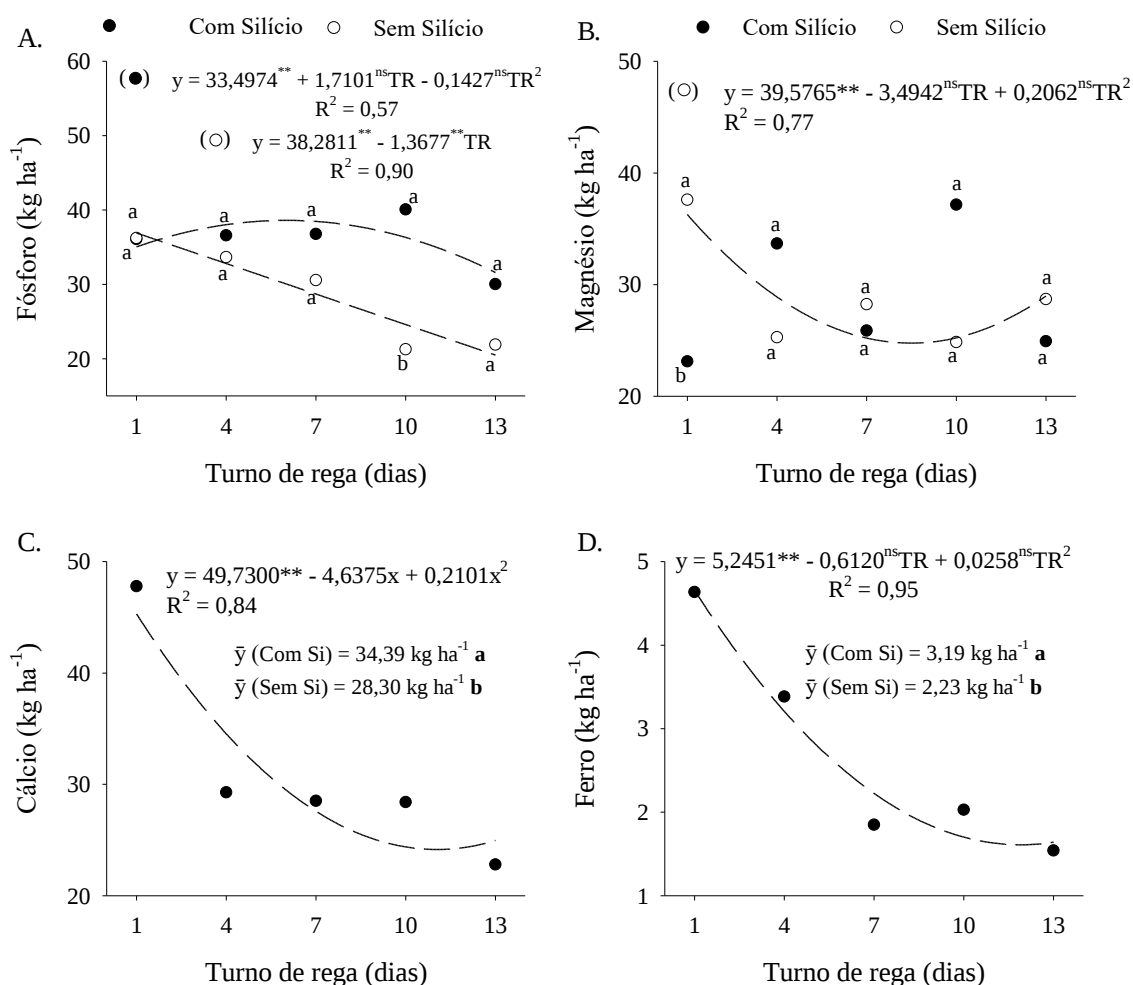


Figura 3. Efeito da interação dos fatores estresse hídrico (turno de rega - TR) e aplicação de Si (com e sem Si) sobre a exportação de Fósforo (A) e Magnésio (B), e efeito isolado desses fatores sobre a exportação dos nutrientes Cálcio (C) e Ferro (D) pelas espigas de milho cultivado no semiárido Alagoano.

Os dados de exportação de Mg das plantas tratadas com a aplicação de Si apresentaram grande variação entre os níveis de TR (Figura 3B). Nenhum modelo de regressão se ajustou aos dados. As plantas tratadas sem a aplicação de Si apresentaram resposta quadrática para a exportação de Mg, em que a maior exportação foi observada no TR de 1 dia (36,28 kg ha⁻¹) e a menor no TR de 8,5 dias (24,77 kg ha⁻¹). O desdobramento da aplicação ou não de Si dentro dos turnos de rega (Figura 3B) evidenciou diferença significativa para a aplicação de silício apenas no tratamento com 1 TR. Para os demais turnos de rega (4, 7, 10 e 13) não se constatou diferença entre a aplicação ou não de silício nas plantas.

A exportação de Ca reduziu com o aumento dos TR (Figura 3C). A máxima exportação de Ca foi observada no tratamento de 1 dia de TR, e a menor observada no TR de 11 dias, com médias de 45,3 e 24,14 kg ha⁻¹. Observa-se grande variação entre as médias dos tratamentos de 4, 7 e 10 dias de TR, sendo estas de 34,54, 27,56 e 24,36 kg ha⁻¹, na devida ordem. O modelo de regressão que melhor se ajustou aos dados foi o quadrático decrescente. Houve diferença significativa entre a aplicação ou não de Si nas plantas (Figura 3C), em que as plantas tratadas com Si apresentaram média significativamente superior de exportação de Ca em comparação às plantas tratadas sem o Si, conforme teste de Tukey ($p < 0,05$).

A exportação de Fe apresentou redução conforme o aumento dos níveis de estresse hídrico (Figura 3D). A maior média de exportação de Fe pelas plantas de milho foi observada no TR de 1 dia, com média de 4,65 kg ha⁻¹, seguido do TR de 4 dias com média de 3,2 kg ha⁻¹. Já a menor média foi observada no TR de 13 dias, com diferença de 3,01 kg ha⁻¹ da média máxima. A aplicação de Si proporcionou maior média de exportação de Fe para as plantas de milho em comparação com o tratamento sem Si, e conforme o teste de Tukey ($p < 0,05$), os tratamentos apresentaram diferença significativa entre si (Figura 3D).

O aumento do déficit hídrico reduz os teores de macronutrientes nas plantas de arroz (Mauad, Crussiol e Grassi Filho, 2011), que assim como o milho, pertence à família Poaceae, e ambas são acumuladoras de Si. No entanto, os mesmos autores não observaram diferença significativa para aplicação de Si nos teores de macronutrientes.

É sabido que o equilíbrio de nutrientes nas plantas está substancialmente correlacionado com o estado da água das células vegetais. A este respeito, muitos estudos relatam que a irrigação por déficit reduz o crescimento das plantas, afetando vários processos fisiológicos e bioquímicos, como fotossíntese, respiração, translocação, absorção de íons, carboidratos, metabolismo de nutrientes e promotores de crescimento (Farooq et al., 2008; Razmjoo, Heydarizadeh e Sabzalian, 2008; Salem et al., 2021). Além disso, a redução do suprimento de água causa depressão nos traços fisiológicos, anatômicos e agrônômicos das plantas (El-Bially et al., 2018; El-Metwally et al., 2021; Makhoul, Soha e Saoudy 2022).

Nas plantas estressadas, o acúmulo de ácido abscísico é estimulado nas folhas, o que cria um desequilíbrio iônico que obriga o íon de potássio (K^+) a vazar das células-guarda, ocorrendo a perda da pressão de turgor destas células. Dessa forma, a diminuição do turgor se dá principalmente devido à redução do teor relativo de água das folhas e ao aumento do fechamento estomatal (Abd El-Mageed et al., 2021; Makhoulf, Soha e Saudy, 2022).

O déficit de água reduz a concentração de N e P no tecido vegetal (He e Dijkstra, 2014) e a absorção de nutrientes do solo (Ge et al. 2012; Sardans e Peñuelas, 2012). Diminuições na absorção de nutrientes durante a seca podem ser atribuídas à redução do suprimento de nutrientes através do processo de mineralização (Sanaullah et al., 2012; Saudy, El-Metwally e Adb El-Samad, 2020), reduzindo a difusão de nutrientes e o fluxo de massa no solo (Lambers et al. 2008). A baixa disponibilidade de água causa distúrbios na cinética dos nutrientes, o que pode diminuir a absorção de nutrientes pelas raízes das plantas (Christophe et al., 2011). Corroborando, os resultados obtidos na presente pesquisa evidenciaram que a concentração de macro e micronutrientes foi reduzida significativamente pelo baixo suprimento de água (Figuras 2 e 3).

De acordo com o teste de Tukey ($p < 0,05$), houve diferença significativa entre as duas condições de aplicação de Si (Tabela 4). As plantas tratadas com a aplicação de Si apresentaram maiores médias de exportação dos nutrientes N, S, Zn e do elemento Si em comparação às plantas tratadas sem a aplicação de Si, tendo-se verificado incrementos percentuais das plantas com silício em relação as plantas sem aplicação de silício de 24,40, 15,80, 24,29 e 70,97%, respectivamente.

Tabela 4. Efeito da aplicação de Si sobre a exportação dos nutrientes fósforo, enxofre e zinco e do elemento silício pela espiga do milho cultivado no semiárido Alagoano.

Tratamento	Nitrogênio	Enxofre	Zinco	Silício
	kg ha ⁻¹			
Com Si	269,08 a	38,33 a	4,81 a	10,07 a
Sem Si	216,29 b	33,10 b	3,87 b	5,89 b

Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Incremento na dose de Si pode aumentar o acúmulo de nutrientes pelas plantas. Maior conteúdo foliar de Mg, Ca, K e P em alface foi observado por Souza et al. (2015). A aplicação de Si aumentou significativamente os teores de Si nas duas cultivares de arroz

estudadas por Mauad, Crussiol e Grassi Filho (2011). O aumento da absorção de Si, principalmente em plantas sob estresse, contribui para manter a homeostase e equilibrar as proporções de nutrientes no tecido foliar, com função metabólica em detrimento da função estrutural. Assim, o Si otimiza o metabolismo energético e aumenta a resistência à seca das plantas, com respostas variando de acordo com o nível e a duração do déficit hídrico (Teixeira et al., 2020).

Zannão Júnior et al. (2019) observaram maior concentração de Si em plantas tratadas com a suplementação do elemento em relação ao tratamento controle na cultura do arroz. Cunha et al. (2012) relatam maior teor de Si em mudas de cafeeiro tratadas com adição de Si na solução nutritiva em comparação ao tratamento sem Si.

A aplicação de Si promoveu maior extração e exportação de nutrientes pela cultura em relação ao tratamento sem aplicação do elemento, em que ordem decrescente de extração de nutrientes pela cultura do milho tratado com Si foi de: $N > K > Ca > Mg > P > S > Si > Zn > Mn > Fe > Cu$. Para a condição sem aplicação de Si a ordem encontrada foi de: $N > K > Ca > Mg > S > P > Si > Zn > Mn > Fe > Cu$, respectivamente. Para a exportação de nutrientes, a ordem decrescente no tratamento com Si foi de: $N > S > K > P > Ca > Mg > Si > Zn > Fe > Cu > Mn$, enquanto que no tratamento sem Si foi de: $N > S > K > Mg > P > Ca > Si > Zn > Fe > Cu > Mn$.

1.1. Matéria seca total e matéria seca da espiga de milho

Na Tabela 5 encontra-se apresentado o resumo da Análise de Variância para as variáveis matéria seca da espiga (MSE) e matéria seca total (MST) avaliadas aos 135 DAP. De acordo com o teste de Fisher, houve diferença significativa entre os níveis de estresse hídrico (E) apenas para a MST das plantas de milho, e que este efeito foi mais pronunciado sobre o acúmulo de matéria seca da parte aérea (MSPA) das plantas do que sobre a MSE, já que a MSE não sofreu efeito significativo pelos níveis de estresse. Observa-se que a aplicação de Si não influenciou significativamente o acúmulo de matéria seca.

Tabela 5. Resumo da Análise de Variância para exportação de macronutrientes, micronutrientes e o elemento Si em função dos fatores estresse hídrico (turnos de rega - TR) e silício (com e sem aplicação) no milho cultivado no semiárido alagoano.

FV	GL	Quadrados médios	
		MSE	MST = MSPA + MSE
Bloco	3	2.607.705,88 ^{ns}	16.834.012,98 ^{ns}
Estresse (E)	4	14.885.187,68 ^{ns}	212.689.839,94 ^{**}
Silício (S)	1	228.729,61 ^{ns}	58.071.819,41 ^{ns}
E x S	4	12.822.196,46 ^{ns}	14.744.688,99 ^{ns}
CV E %		25,73	18,94
CV S %		24,8	15,18
Média geral		10.032,45	29.152,8

FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; CV: Coeficiente de variação; ^{ns}: não significativo; ^{**} e ^{*}: significativo à 1 e 5%, respectivamente, pelo teste de Fisher.

Observa-se na Figura 4 que a MST sofreu redução à medida em que se aumentaram os TR. A máxima produtividade de MST foi observada no tratamento de 1 dia de TR, com média de 35.532,06 kg ha⁻¹, e a menor foi observada no TR de 13 dias, com diferença de 12.758,5 kg ha⁻¹.

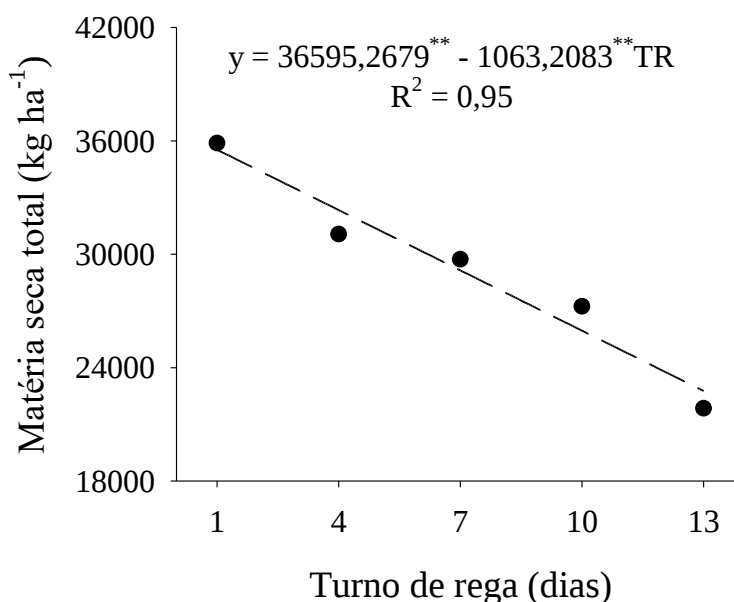


Figura 4. Efeito dos turnos de rega sobre a matéria seca total das plantas de milho cultivadas no semiárido Alagoano.

A água está envolvida em vários processos na planta, dentre eles o crescimento celular, através da turgescência celular. Dessa forma, a diminuição da disponibilidade de água para as plantas, devido ao aumento da tensão de água no solo, reduz o crescimento e desenvolvimento da planta, refletindo desta forma no acúmulo de massa seca (Mauad, Crussiol e Grassi Filho, 2011). Corroborando os resultados deste estudo, Khalid et al. (2022) também verificaram redução da matéria seca em função do déficit de água.

2. CONCLUSÕES

O aumento nos níveis de déficit hídrico diminuiu significativamente a extração e a exportação de macro e de micronutrientes, além do nutriente benéfico Si, exceto a extração de K.

Os maiores níveis de déficit hídrico reduziram a matéria seca das plantas de milho.

A aplicação de Si proporcionou maior extração e maior exportação de nutrientes em comparação à não aplicação do nutriente.

A ordem decrescente de extração de nutrientes pela cultura do milho com aplicação de Si foi: $N > K > Ca > Mg > P > S > Si > Zn > Mn > Fe > Cu$. Sem aplicação: $N > K > Ca > Mg > S > P > Si > Zn > Mn > Fe > Cu$.

Para a exportação de nutrientes, a ordem decrescente com aplicação de Si foi: $N > S > K > P > Ca > Mg > Si > Zn > Fe > Cu > Mn$. Sem aplicação: $N > S > K > Mg > P > Ca > Si > Zn > Fe > Cu > Mn$.

3. REFERÊNCIAS

- ABD EL-MAGEED, T. A.; BELAL, E. E.; RADY, M. O. A.; ABD EL-MAGEED, S. A.; MANSOUR, E.; AWAD, M.F.; SEMIDA, W. M. Acidified biochar as a soil amendment to drought stressed (*Vicia faba* L.) plants: Influences on growth and productivity, nutrient status, and water use efficiency. **Agronomy**, v. 11, n. 7, 2021. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071290>
- ALI, N.; RÉTHORÉ, E.; YVIN, J.C.; HOSSEINI, S. A. The Regulatory Role of Silicon in Mitigating Plant Nutritional Stresses. **Plants**, v. 9, n. 12, p. 1779, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants9121779>
- BEZERRA NETO, E.; BARRETO, L. P. Análises químicas e bioquímicas em plantas. 1 ed. Recife: UFRPE, Editora Universitária da UFRPE, 2011. 267p.
- CHAIWONG, N., PROM-U-THAI, C. Significant roles of silicon for improving crop productivity and factors affecting silicon uptake and accumulation in rice: A Review. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, p. 1970–1982, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00787-y>
- CHRISTOPHE, S.; JEAN-CHRISTOPHE, A.; ANNABELLE, L.; ALAIN, O.; MARION, P.; ANNE-SOPHIE, V. Plant N fluxes and modulation by nitrogen, heat and water stresses: a review based on comparison of legumes and non-legume plants. In: SHANKER, A.; VENKATESWARLU, B. **Abiotic stress in plants – mechanisms and adaptations**. First Edition. In-TechOpen, 2011. p. 79–118. <http://dx.doi.org/10.5772/23474>
- COELHO, A. P.; FARIA, R. T.; LEAL, F. T.; BARBOSA, J. A.; LEMOS, L. B. Biomass and nitrogen accumulation in white oat (*Avena sativa* L.) under water deficit. **Revista Ceres**, v. 67, n. 1, p. 1–8, 2020. <https://doi.org/10.1590/0034-737X202067010001>
- COVRE, A. M.; PARTELLI, F. L.; BONOMO, R.; TOMAZ, M. A.; RAMALHO, J. C. Impacts of water availability on macronutrients in fruit and leaves of conilon coffee. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 9, p. 1025–1037, 2018. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018000900006>
- CUNHA, A. C. M. C. M.; OLIVEIRA, M. L.; CABALLERO, E. C.; MARTINEZ, H. E. P.; FONTES, P. C. R.; PEREIRA, P. R. G. Growth and nutrient uptake of coffee seedlings cultivated in nutrient solution with and without silicon addition. **Revista Ceres**, v. 59, n. 3, p. 392–398, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2012000300015>
- DETMANN, K. C.; ARAÚJO, W. L.; MARTINS, S. C. V.; FERNIE, A. R.; DAMATTA, F. M. Metabolic alterations triggered by silicon nutrition: Is there a signaling role for silicon? **Plant Signaling and Behavior**, v. 8, n. 1, p. 71–74, 2013. DOI: 10.4161/psb.22523
- DETMANN, K. C.; ARAÚJO, W. L.; MARTINS, S. C. V.; SANGLARD, L. M. V. P.; REIS, J. V.; DETMANN, E.; RODRIGUES, F. A.; NUNES-NESE, A.; FERNIE, R. A.; DAMATTA, F. M. Silicon nutrition increases grain yield, which, in turn, exerts a

- feed-forward stimulation of photosynthetic rates via enhanced mesophyll conductance and alters primary metabolism in rice. **New Phytologist**, v. 196, n. 3, p. 752–762, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04299.x>
- EL-BIALLY, M. A.; SAUDY, H. S.; EL-METWALLY, I. M.; SHAHIN, M. G. Efficacy of ascorbic acid as a cofactor for alleviating water deficit impacts and enhancing sunflower yield and irrigation water-use efficiency. **Agricultural Water Management**, v. 208, p. 132–139, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.016>
- EL-METWALLY, I. M.; SAUDY, H. S.; ABDELHAMID, M. T. Efficacy of benzyladenine for compensating the reduction in soybean productivity under low water supply. **Italian Journal of Agrometeorology**, n. 2, p. 81–90, 2021. <https://doi.org/10.36253/ijam-872>
- FAROOQ, M.; BASRA, S. M. A.; WAHID, A.; CHEEMA, Z. A.; CHEEMA, M. A.; KHALIQ, A. Physiological role of exogenously applied glycinebetaine in improving drought tolerance of fine grain aromatic rice (*Oryza sativa* L.). **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 194, n. 5, p. 325–333, 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2008.00323.x>
- FERREIRA, D. F. SISVAR: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Revista Brasileira de Biometria*, v. 37, n. 4, p. 529–535, 2019. <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>
- GE, T. D.; SUN, N. B.; BAI, L. P.; TONG, C. L.; SUI, F. G. Effects of drought stress on phosphorus and potassium uptake dynamics in summer maize (*Zea mays*) throughout the growth cycle. **Acta Physiologicae Plantarum**, v. 34, n. 6, p. 2179–2186, 2012. DOI: 10.1007/s11738-012-1018-7
- GHOSH, A.; AGRAWAL, M.; AGRAWAL, S. B. Effect of water deficit stress on an Indian wheat cultivar (*Triticum aestivum* L. HD 2967) under ambient and elevated level of ozone. **Science of The Total Environment**, v. 714, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136837>
- GONZÁLEZ-MOSCOSO, M.; MARTÍNEZ-VILLEGAS, N. V.; MEZAFIGUEROA, D.; RIVERA-CRUZ, M. C.; CADENAS-PLIEGO, G.; JUÁREZ-MALDONADO, A. SiO₂ nanoparticles improve nutrient uptake in tomato plants developed in the presence of arsenic. **Revista Bio Ciencias**, v. 8, p. e1084, 2021. DOI: <https://doi.org/10.15741/revbio.08.e1084>
- HE, M.; DIJKSTRA, F. A. Drought effect on plant nitrogen and phosphorus: a meta-analysis. **New Phytologist**, v. 204, n. 4, p. 924–931, 2014.
- JINGER, D.; DHAR, S.; DASS, A.; SHARMA, V. K.; PARAMESH, V.; PARIHAR, M.; JOSHI, E.; SINGHAL, V.; GUPTA, G.; PRASAD, D.; & VIJAYAKUMAR, S. Co-fertilization of silicon and phosphorus influences the dry matter accumulation, grain yield, nutrient uptake, and nutrient-use efficiencies of aerobic rice. **Silicon**, v. 14, n. 9, p. 4683–4697, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01239-5>

- KARIMZADEH, J.; ALIKHANI, H. A.; ETESAMI, H.; POURBABAEI, A. A. Improved Phosphorus Uptake by Wheat Plant (*Triticum aestivum* L.) with Rhizosphere Fluorescent Pseudomonads Strains Under Water-Deficit Stress. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 40, n. 1, p. 162–178, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10087-3>
- KHALID, M. F.; HUSSAIN, S.; ANJUM, M. A.; MORILLON, R.; AHMAD, S.; EJAZ, S.; HUSSAIN, M.; JAAFAR, H. Z. E.; ALRASHOOD S. T.; ORMENISAN, A. N. Retraction: Physiological and biochemical responses of Kinnow mandarin grafted on diploid and tetraploid Volkamer lemon rootstocks under different water-deficit regimes. **PLOS ONE**, v. 16, n. 4, p. e0247558, 2022. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247558>
- KOVÁCS, S.; KUTASY, E.; CSAJBÓK, J. The Multiple Role of Silicon Nutrition in Alleviating Environmental Stresses in Sustainable Crop Production. **Plants**, v. 11, n. 9, p. 1223, 2022. <https://doi.org/10.3390/plants11091223>
- LAMBERS, H.; CHAPIN, F. S.; PONS, T. L. **Plant physiological ecology**. 2^a ed. New York: Springer, 2008. 623 p.
- MAHMOUD, A. W. M.; RASHAD, H. M.; ESMAIL, S. E. A.; ALSAMADANY, H.; ABDELDAYM, E. A. Application of silicon, zinc, and zeolite nanoparticles — a tool to enhance drought stress tolerance in coriander plants for better growth performance and productivity. **Plants**, v. 12, n. 15, 25 p., 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12152838>
- MAKHLOUF, B. S. I.; SOHA, K. R. A.; SAUDY, H. S. Efficacy of humic acids and chitosan for enhancing yield and sugar quality of sugar beet under moderate and severe drought. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 2, p. 1676-1691, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00762-7>
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. Academic Press, 2 ed., 889p., 1995.
- MAUAD, M.; CRUSCIOL, C. A. C.; GRASSI FILHO, H. Produção de massa seca e nutrição de cultivares de arroz de terras altas sob condição de déficit hídrico e adubação silicatada. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, n. 3, p. 939–948, 2011. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2011v32n3p939>
- OLIVEIRA, F. S. SARMENTO, S. E. C.; DOMBROSKI, J. L. D.; SILVA, D. V.; FREITAS, C. D. M.; SOUZA, M. F.; BORGES, M. P. S.; & SILVEIRA, L. M. Accumulation of macronutrients in cowpea and weeds in competition and under soil water deficit. **Bioscience Journal**, v. 35, n. 6, p. 1747–1757, 2019b. DOI 10.14393/BJ-v35n6a2019-42432.
- OLIVEIRA, K. S.; PRADO, R. M.; GUEDES, V. H. Leaf Spraying of Manganese with Silicon Addition Is Agronomically Viable for Corn and Sorghum Plants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 1, n. 3, p. 1-9, 2020. <http://dx.doi.org/10.1007/s42729-020-00173-6>

- OLIVEIRA, R. L. L.; PRADO, R. M.; FELISBERTO, G.; CHECCHIO, M. V.; GRATÃO, P. L. Silicon Mitigates Manganese Deficiency Stress by Regulating the Physiology and Activity of Antioxidant Enzymes in Sorghum Plants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, p. 524-534, 2019a. DOI: 10.1007/s42729-019-00051-w
- RAZMJOO, K.; HEYDARIZADEH, P.; SABZALIAN, M. R. Effect of salinity and drought stresses on growth parameters and essential oil content of *Matricaria chamomile*. **International Journal of Agriculture and Biology**, v. 10, n. 4, p. 451–454, 2008.
- SALEM, E. M. M.; KENAWAY, M. K. M.; SAUDY, H. S. et al. Influence of Silicon Forms on Nutrients Accumulation and Grain Yield of Wheat Under Water Deficit Conditions. **Gesunde Pflanzen**, v. 74, n. 3, p. 539–548, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00629-y>
- SALEM, E. M. M.; KENAWAY, M. K. M.; SAUDY, H. S.; MUBARAK, M. Soil mulching and deficit irrigation effect on sustainability of nutrients availability and uptake, and productivity of maize grown in calcareous soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 52, n. 15, p. 1745–1761, 2021. <https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1892733>
- SANAULLAH, M.; RUMPEL, C.; CHARRIER, X.; CHABBI, A. How does drought stress influence the decomposition of plant litter with contrasting quality in a grassland ecosystem? **Plant and Soil**, v. 352, n. 1-2, p. 277–288, 2012.
- SARDANS, J.; PEÑUELAS, J. The role of plants in the effects of global change on nutrient availability and stoichiometry in the plant-soil system. **Plant Physiology**, v. 160, n. 4, p. 1741–1761, 2012.
- SAUDY, H. S.; EL-METWALLY, I. M.; ABD EL-SAMAD, G. A. Physio-biochemical and nutrient constituents of peanut plants under bentazone herbicide for broad-leaved weed control and water regimes in dry land areas. **Journal of Arid Land**, v. 12, n. 4, p. 630–639, 2020. <https://doi.org/10.1007/s40333-020-0020-y>
- SILVA, F. C. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2ª ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627p.
- SILVA, L. S.; BOHNEN, H. Rendimento e acúmulo de nutrientes pelo arroz em solução nutritiva com e sem a adição de silício. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 3, p. 771-777, 2001.
- SOUSA, G. F. G.; CARVALHO, C. R. S.; MELO, M. M. R.; FILHO, H. G. Absorção de macronutrientes e sódio pelo tomateiro submetido a irrigação com e sem déficit hídrico, utilizando diferentes concentrações de água residuária. **Irriga**, v. 26, n. 1, p. 65–76, 2021. DOI: 10.15809/irriga.2021v26n1p65-76
- SOUZA, R. S.; REZENDE, R.; FREITAS, P. S. L.; GONÇALVES, A. C. A.; REZENDE, G. S. Dry matter production and macronutrient leaf composition in lettuce under fertigation with nitrogen, potassium and silicon. **Revista Brasileira de Engenharia**

- Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 12, p. 1166–1171, 2015. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n12p1166-1171>
- TEIXEIRA, G. C. M.; PRADO, R. M.; ROCHA, A. M. S.; PICCOLO, M. C. Root- and foliar-applied silicon modifies C: N: P ratio and increases the nutritional efficiency of pre-sprouted sugarcane seedlings under water deficit. **PLOS ONE**, v. 15, n. 10 p. e0240847, 2020. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240847>
- WU, J.; WANG, J.; HUI, W.; ZHAO, F.; WANG, P.; SU, C.; GONG, W. Physiology of Plant Responses to Water Stress and Related Genes: A Review. **Forests**, v. 13, n. 2, p. 324, 2022. <https://doi.org/10.3390/f13020324>
- ZANÃO JÚNIOR, L. A.; ALVAREZ, V. H.; FONTES, R. L. F.; CARVALHO-ZANÃO, M. P.; PEREIRA, N. Silicon sources for studies of rice plants in nutrient solutions. **Bioscience Journal**, v. 35, n. 6, p. 1659-1663, 2019. <http://dx.doi.org/10.14393/BJ-v35n6a2019-42421>

-----CAPÍTULO IV-----

**EFEITO DA APLICAÇÃO DE SILÍCIO SOBRE VARIÁVEIS DE PRODUÇÃO
DO MILHO SUBMETIDO AO ESTRESSE HÍDRICO NO SEMIÁRIDO**

CAPÍTULO IV - EFEITO DA APLICAÇÃO DE SILÍCIO SOBRE VARIÁVEIS DE PRODUÇÃO DO MILHO SUBMETIDO AO ESTRESSE HÍDRICO NO SEMIÁRIDO

Resumo: A demanda por alimentos tem se elevado de maneira significativa, aumentando os desafios enfrentados pelos agricultores em todo o mundo, sobretudo em regiões semiáridas onde a escassez hídrica é fator limitante para o rendimento das culturas. A fertilização com silício é uma alternativa viável para mitigar os efeitos causados por estresses abióticos. Neste contexto, objetivou-se estudar o efeito da aplicação de silício como atenuante de estresse hídrico sobre parâmetros de produção de milho no semiárido alagoano. A pesquisa foi realizada no IFAL-Campus Piranhas. O delineamento experimental foi em faixas com quatro repetições esquematizadas em parcelas subdivididas, em que as parcelas foram tratadas com os níveis de estresse hídrico (1, 4, 7, 10 e 13 dias de turno de rega), e as subparcelas tratadas com a aplicação ou não aplicação de silicato de potássio. Por ocasião da colheita, foi medido o rendimento de milho verde (grão leitoso) e a produtividade de grãos secos (maturação fisiológica). O acréscimo dos níveis de estresse hídrico causou reduções nos parâmetros de produção do milho, reduzindo o comprimento e o diâmetro de espigas. Reduções no número de espigas foram observadas com o aumento dos níveis de déficit hídrico, e consequentemente, na produtividade de milho verde e de grãos secos. As plantas tratadas com a aplicação de Si apresentaram maior número de espigas, maior produtividade de espigas verdes e de espigas verdes comercializáveis e produtividade de grãos.

Palavras-chave: *Zea mays*, espiga de milho, rendimento de grãos, silicato

EFFECT OF SILICON APPLICATION ON PRODUCTION VARIABLES OF CORN SUBJECTED TO WATER STRESS IN THE SEMI-ARID

Abstract: The demand for food has increased significantly, increasing the challenges faced by farmers around the world, especially in semi-arid regions where water scarcity is a limiting factor for crop yields. Silicon fertilization is a viable alternative to mitigate the effects caused by abiotic stresses. In this context, the objective was to study the effect of the application of silicon as a mitigating factor of water stress on corn production parameters in the semi-arid region of Alagoas. The research was conducted at the IFAL-Campus Piranhas. The experimental design was in strips with four repetitions schematized in subdivided plots, in which the plots were treated with the levels of water stress (1, 4, 7, 10 and 13 days of irrigation intervals), and the subplots treated with the application or non-application of potassium silicate. At the time of harvest, the yield of green corn (kernel milk stage) and the productivity of dry grains (physiological maturity) were measured. The increase in water stress levels caused reductions in corn production parameters, reducing the length and diameter of ears. Reductions in the number of ears were observed with the increase in water deficit levels, and consequently, in the productivity of green corn and dry grains. The plants treated with the application of Si showed a higher number of ears, higher productivity marketable green ears and green ears and grain productivity.

Key words: *Zea mays*, silicate, corn cob, kernel yield, silicate

1. INTRODUÇÃO

O crescente aumento populacional global tem intensificado a pressão sobre os sistemas alimentares, tornando a segurança alimentar uma preocupação crucial para o futuro (Wijerathna-Yapa e Pathirana, 2022). Uma questão particularmente desafiadora é a baixa produtividade de plantas alimentícias em regiões semiáridas, onde as condições climáticas adversas, como escassez de água e altas temperaturas, limitam a capacidade das culturas de alcançarem seu potencial máximo de produção (Silva et al., 2022).

O déficit hídrico exerce um impacto significativo sobre a produtividade do milho, principalmente da ocorrência no período crítico (pré-floração ao enchimento de grãos), em que as plantas enfrentam dificuldades em manter processos metabólicos essenciais, como a fotossíntese, resultando em menor acúmulo de biomassa e, consequentemente, em rendimentos de grãos reduzidos (Bergamaschi et al., 2004). Além disso, o estresse hídrico afeta negativamente a eficiência no uso da água pelas plantas de milho, levando a uma maior vulnerabilidade em face de condições ambientais adversas (Silva et al., 2019).

O silício tem emergido como um elemento benéfico no cultivo de plantas, desempenhando um papel crucial como atenuante de estresse hídrico. A aplicação estratégica de silício no solo e nas plantas tem demonstrado resultados promissores na melhoria da resistência das culturas à escassez de água (Linné et al., 2022). O silício atua como um modulador fisiológico, fortalecendo a estrutura celular, aumentando a eficiência fotossintética e do transporte de água, minimizando assim, os efeitos adversos do estresse hídrico sobre as plantas (Ahmed et al., 2013; Kim et al., 2016).

Ao ser absorvido pelas raízes, o silício é depositado nas células, fortalecendo as paredes celulares e conferindo maior rigidez aos tecidos vegetais. Essa maior resistência celular proporciona uma resposta mais eficaz das plantas ao estresse hídrico, reduzindo a perda de água por transpiração e mantendo a integridade estrutural mesmo em condições adversas (Marschner, 1995; Menegale et al., 2015). Além disso, a presença de silício estimula a expressão de genes relacionados ao estresse, desencadeando respostas adaptativas que conferem uma maior tolerância à falta d'água (Kim et al., 2017).

Portanto, a utilização estratégica do silício como atenuante de estresse hídrico representa uma abordagem inovadora e sustentável na agricultura, contribuindo para a

preservação da produtividade das culturas em face das mudanças climáticas e da crescente variabilidade nas condições ambientais, garantindo a segurança alimentar mundial, principalmente em regiões semiáridas onde as plantas alimentícias apresentam baixa produtividade.

Assim, objetivou-se com este estudo avaliar o efeito da aplicação de silício sobre as variáveis de produção do milho submetido a diferentes níveis de déficit hídrico no semiárido alagoano.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Rendimento de espigas verdes

O milho verde foi colhido no estágio fenológico R3 quando os grãos apresentaram teor de água entre 70 e 80%. Foram avaliadas as plantas de três metros lineares de uma das linhas dentro da área útil da subparcela, onde foi obtido o número e peso totais de espigas empalhadas e despalhadas, e o número e peso de espigas comercializáveis empalhadas e despalhadas com o auxílio de balança comercial com precisão de 5 gramas (Silva et al., 2003; Silva et al., 2014).

Como espigas verdes empalhadas comercializáveis foram consideradas aquelas com aparência adequada à comercialização, isto é, sem evidências aparentes do ataque de pragas e com comprimento superior a 0,19 m. Como espigas despalhadas comercializáveis foram consideradas aquelas com aparência adequada à comercialização, isto é, bem granadas, não atacadas por pragas e com comprimento superior a 0,12 m (Silva et al., 2014).

2.2. Rendimento de grãos e componentes de produção

A colheita de grãos na área útil da subparcela foi realizada na fase de maturação fisiológica (quando os grãos apresentarem teor de umidade de 20%). Foram avaliados o número de espigas ha^{-1} (estimada com base nas espigas colhidas em três metros lineares de uma das linhas dentro da área útil da subparcela), o diâmetro de espigas (utilizando-se um paquímetro digital) e o comprimento de espigas (feito com o auxílio de uma trena, medindo-se as espigas longitudinalmente).

Além destes, foram avaliados o número de fileiras nas espigas (dado pela contagem do número de fileiras das espigas colhidas em três metros lineares de uma das linhas dentro da área útil da parcela), a massa de 1000 grãos (dado pela pesagem ao acaso de amostras de 1000 grãos das espigas colhidas na área útil da subparcela), tendo-se em seguida suas massas ajustadas para 13% de teor de umidade, e através destes dados, foi estimado o rendimento de grãos, expresso em quilogramas por hectare.

2.3. Análises estatísticas

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo teste F ($p < 0,05$ e $p < 0,01$), e havendo significância no fator qualitativo, foram submetidos ao teste de comparação de médias, teste de Tukey ($p < 0,05$), e o fator quantitativo foi submetido à regressão polinomial na análise de variância, decompondo-se os graus de liberdade em componentes de regressão. Para isso foi utilizado o programa estatístico Sisvar versão 5.8 (Ferreira, 2019). A escolha do modelo que melhor se ajustou aos dados foi baseada nos seguintes critérios: no efeito não significativo do desvio de regressão, na significância dos parâmetros da equação de ajuste ($p < 0,05$), no maior valor do coeficiente de determinação (R^2) e na explicação biológica de cada variável em função dos tratamentos avaliados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Rendimento e características das espigas de milho verde

Houve efeito significativo dos níveis de estresse na produtividade total de espigas empalhadas e despalhadas e na produtividade de espigas empalhadas comercializáveis (Tabela 1). O fator aplicação de Si não proporcionou efeito significativo sobre nenhuma variável de produtividade de espigas verdes. A combinação destes dois fatores foi significativa para a produtividade total de espigas empalhas e despalhas e na produtividade de espigas empalhadas comercializáveis.

Tabela 1. Resumo da Análise de Variância para as variáveis de número de espigas por hectare (NEV), produtividade de espigas empalhadas e despalhadas, e produtividade de espigas empalhadas e despalhadas comercializáveis (EC) avaliadas na cultura do milho na fase de milho verde tratado com déficit hídrico (turnos de rega - TR) e aplicação de silício no semiárido Alagoano.

FV	GL	Quadrados médios				
		NEV	Produtividade total		Produtividade EC	
			Empalhada	Despalhada	Empalhada	Despalhada
Bloco	3	143612713,53 ^{ns}	18784310,28 ^{ns}	7635395,82 ^{ns}	26463952,90 ^{ns}	12425728,51 ^{ns}
Estresse (E)	4	946710124,71 ^{**}	73793104,84 ^{**}	13664383,81 ^{**}	73009614,83 ^{**}	12431972,08 ^{ns}
Silício (S)	1	20408122,44 ^{ns}	667113,99 ^{ns}	1532424,97 ^{ns}	11214386,40 ^{ns}	2101443,12 ^{ns}
E x S	4	116779811,79 [*]	6885460,00 ^{**}	2963108,43 ^{**}	12153597,99 [*]	2842825,9 ^{ns}
CV1 (%)		18,27	27,48	29,91	41,87	43,23
CV2 (%)		11,34	12,61	14,77	25,21	27,033
Média geral		54761,85	9365,31	5639,22	7578,47	4913,2

FV: Fator de variação; GL: Graus de liberdade; CV: Coeficiente de variação; ^{ns}: não significativo; ^{**} e ^{*}: significativo à 1 e 5%, respectivamente, pelo teste de Fisher.

O número de espigas verdes por hectare das plantas tratadas com e sem a aplicação de Si reduziu linearmente em função dos turnos de rega (Figura 1A). As plantas tratadas com a aplicação de Si obtiveram maior número de espigas verdes por hectare (62.857,1) com 1 dia de TR, enquanto que o menor número de espigas verdes por hectare foi obtido com 13 dias de TR (45.238,1 espigas ha⁻¹). Observa-se maior número de espigas verdes por hectare pelas plantas tratadas sem a aplicação de Si com o TR de 1 dia (72.857 espigas ha⁻¹), e o menor número de espigas por hectare obtido com 13 dias de TR (38.094,8 espigas por hectare). O desdobramento dos níveis de aplicação de silício dentro nos níveis dos turnos de rega evidenciou diferença significativa para a aplicação de Si apenas no TR de 1 dia (Figura 1A). Para os demais turnos de rega (4, 7, 10 e 13 dias) não se constatou diferença significativa para a aplicação ou não de Si.

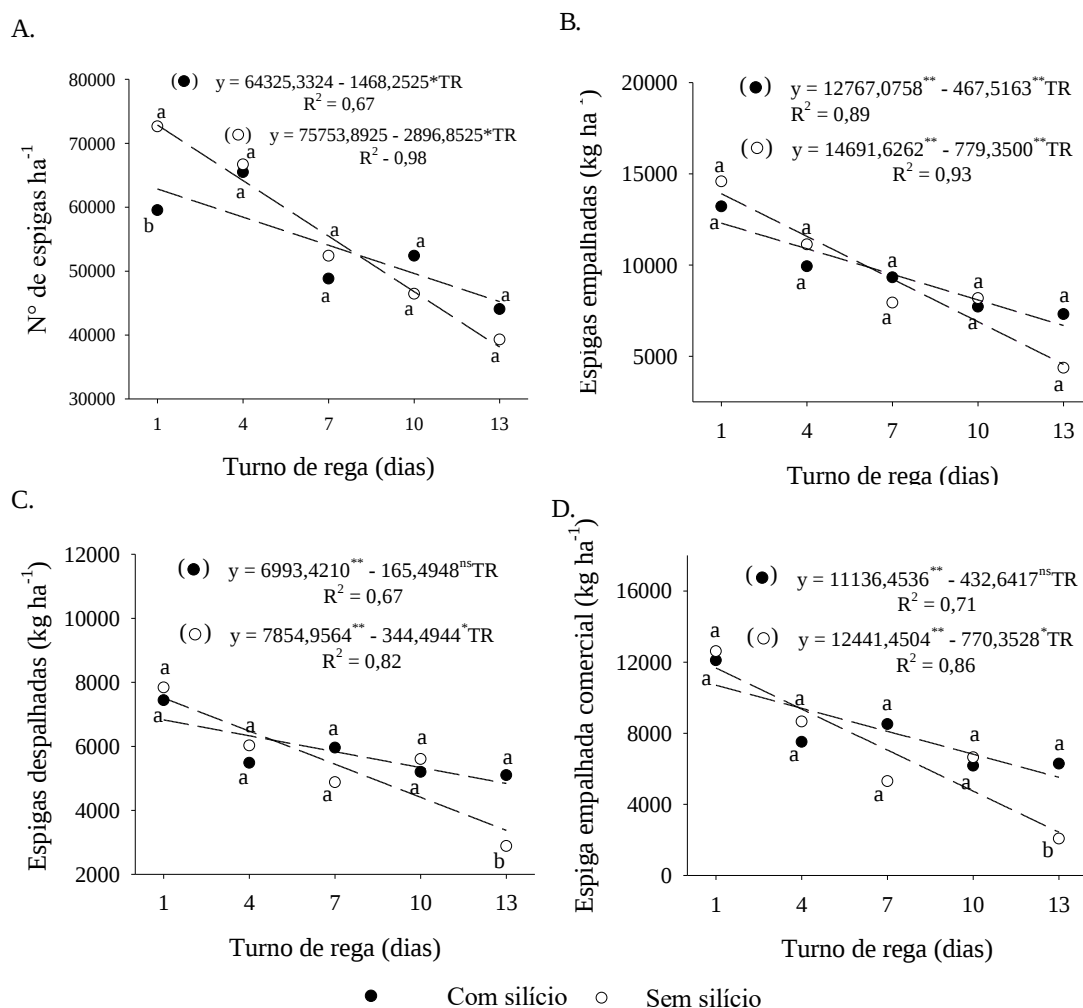


Figura 1. Desdobramento da interação dos fatores estresse hídrico (turnos de rega - TR) e aplicação de silício (com e sem Si) sobre o número de espigas por hectare (A), a produtividade de espiga empalhada e despalhada (B e C, nesta ordem) e produtividade de espiga empalhada comercializável (D) na cultura do milho verde cultivado no semiárido Alagoano.

Observa-se resposta linear decrescente para a produtividade de espigas empalhadas tratadas com a aplicação de Si (Figura 1B), em que a maior produtividade ($12.299,6\ kg\ ha^{-1}$) foi obtida com 1 dia de TR e a menor ($6.689,4\ kg\ ha^{-1}$) com 13 dias de TR. As plantas tratadas sem a aplicação de Si também apresentaram redução linear na produtividade de espigas empalhadas em função dos TR. Observa-se que a máxima produtividade obtida pelas plantas tratadas sem a aplicação de Si foi de $13.912,3\ kg\ ha^{-1}$ com 1 dia de TR, enquanto que a menor produtividade ($4.560,1\ kg\ ha^{-1}$) foi obtida com 13 dias de TR. O desdobramento da aplicação ou não de Si dentro dos turnos de rega não demonstrou

diferença significativa para a aplicação de silício em nenhum dos níveis de estresse hídrico estudados.

A produtividade de espigas despalhadas apresentou ajuste linear decrescente para as plantas tratadas com a aplicação de Si (Figura 1C), em que se observa a máxima produtividade ($6.827,9 \text{ kg ha}^{-1}$) com 1 dia de TR e a menor ($4.841,9 \text{ kg ha}^{-1}$) com 13 dias de TR. As plantas tratadas sem a aplicação de Si também apresentaram redução linear para a produtividade de espigas despalhadas. Observa-se a máxima produtividade de espigas despalhadas de $7.510,5 \text{ kg ha}^{-1}$ para o tratamento sem Si obtida com 1 dia de TR, e a menor produtividade ($3.376,5 \text{ kg ha}^{-1}$) com 13 dias de TR. O desdobramento do fator condição de aplicação de Si dentro dos níveis de turno de rega constatou diferença significativa para a aplicação de Si apenas no TR de 13 dias. Para os demais turnos de rega (1, 4, 7 e 10 dias) não foi demonstrada diferença significativa entre a aplicação ou não de Si.

A produtividade de espigas empalhadas comercializáveis apresentou resposta linear decrescente nas plantas tratadas com e sem a aplicação de Si (Figura 1D). Para as plantas tratadas com a aplicação Si, a máxima produtividade ($10.703,8 \text{ kg ha}^{-1}$) foi obtida com 1 dia de TR e a menor ($5.512,1 \text{ kg ha}^{-1}$) com 13 dias de TR. Para as plantas tratadas sem a aplicação de Si, a máxima produtividade foi de $11.671,1 \text{ kg ha}^{-1}$ obtida com 1 dia de TR e a menor produtividade de espigas empalhadas comercializáveis foi de $2.427,1 \text{ kg ha}^{-1}$ obtida com 13 dias de TR. O desdobramento dos níveis de aplicação de Si dentro dos níveis de turno de rega constatou diferença significativa para a aplicação de Si apenas no TR de 13 dias. Para os demais turnos de rega (1, 4, 7 e 10 dias) não foi demonstrada diferença significativa entre a aplicação ou não de Si.

A ocorrência de déficit hídrico nas fases de florescimento e no enchimento de grãos é um fator importante, visto que pode levar à diminuição no rendimento de espigas de milho. Bazrgar&lrn et al. (2022) verificaram redução no rendimento de espigas com palha e espigas sem palha devido à irrigação deficitária. Chukwudi, Mavengahama e Kutu (2022) observaram que o aumento do estresse hídrico reduziu o rendimento do milho em detrimento da diminuição de 96% do peso da espiga. Rodrigues et al. (2018) em experimento com híbridos de milho em duas safras, observaram menor produtividade de espigas empalhadas e de espigas despalhadas, além de redução na produtividade de espigas comercializáveis na safra em que ocorreu maior período de veranico, em que as

plantas foram expostas ao estresse ambiental por déficit hídrico. O estresse hídrico reduz a capacidade de absorção de nutrientes provindos do solo e influencia negativamente o desenvolvimento das plantas por provocar o fechamento estomático e a redução da fotossíntese líquida (Barros e Calado, 2014).

De outro modo, Cruz et al. (2022), ao estudarem o efeito da adubação foliar com silício sobre as características agronômicas e produtividade do milho, não verificaram diferença significativa para nenhum dos parâmetros relacionados aos componentes de produção do milho verde, dentre eles a produtividade de espigas verdes comerciais. Outrossim, Soares et al. (2022) estudando duas fontes de silício na cultura do milho constataram que a produtividade de espigas verdes não foi influenciada pela aplicação do elemento.

3.2. Rendimento e características das espigas de milho seco

Pode-se observar na Tabela 2, por meio do Resumo da Análise de Variância, que tanto o fator aplicação de Si, como a interação entre este e o estresse (turnos de rega) não proporcionaram efeito significativo sobre nenhuma das variáveis avaliadas. No entanto, houve efeito isolado significativo dos turnos de rega sobre as variáveis de comprimento da espiga (CE), diâmetro da espiga (DE) e número de grãos por fileira (NG). Respalando estes resultados, Araújo et al. (2022) também não verificaram efeito significativo da aplicação de Si sobre o comprimento de espigas, número de fileiras e número de grãos por fileira no milho sob déficit hídrico em região semiárida.

Tabela 2. Resumo da Análise de Variância para variáveis comprimento de espiga (CE), diâmetro de espiga (DE), número de fileiras (NF) e número de grãos por fileira (NG) avaliadas no milho na fase de grão seco tratado com déficit hídrico (turnos de rega - TR) e aplicação de silício no semiárido Alagoano.

FV	GL	Quadrados médios			
		CE	DE	NF	NG
Bloco	3	5,20 ^{ns}	144,10 ^{ns}	5,82 ^{ns}	83,10 [*]
Estresse (E)	4	31,46 ^{**}	200,54 ^{**}	13,94 ^{ns}	107,56 ^{**}
Silício (S)	1	13,93 ^{ns}	74,52 ^{ns}	13,60 ^{ns}	87,40 ^{ns}
E x S	4	4,97 ^{ns}	36,29 ^{ns}	5,73 ^{ns}	20,97 ^{ns}
CV E (%)		17,07	13,81	16,85	15,36
CV S (%)		17,27	14,35	16,4	18,24
Média Geral		13,12	43,22	13,57	28,74

^{ns}: não significativo; ^{**} e ^{*}: significativo à 1 e 5%, respectivamente, pelo teste de Fisher.

Os dados de comprimento de espiga apresentaram comportamento linear redutivo com o aumento dos turnos de rega (Figura 2A). Observa-se maior comprimento de espiga (15,39 cm) nas plantas tratadas com 1 dia de TR, seguido pelas plantas tratadas com 4 dias de TR (14,26 cm). O menor comprimento de espiga foi de 10,86 cm obtido pelas plantas tratadas com 13 dias de TR.

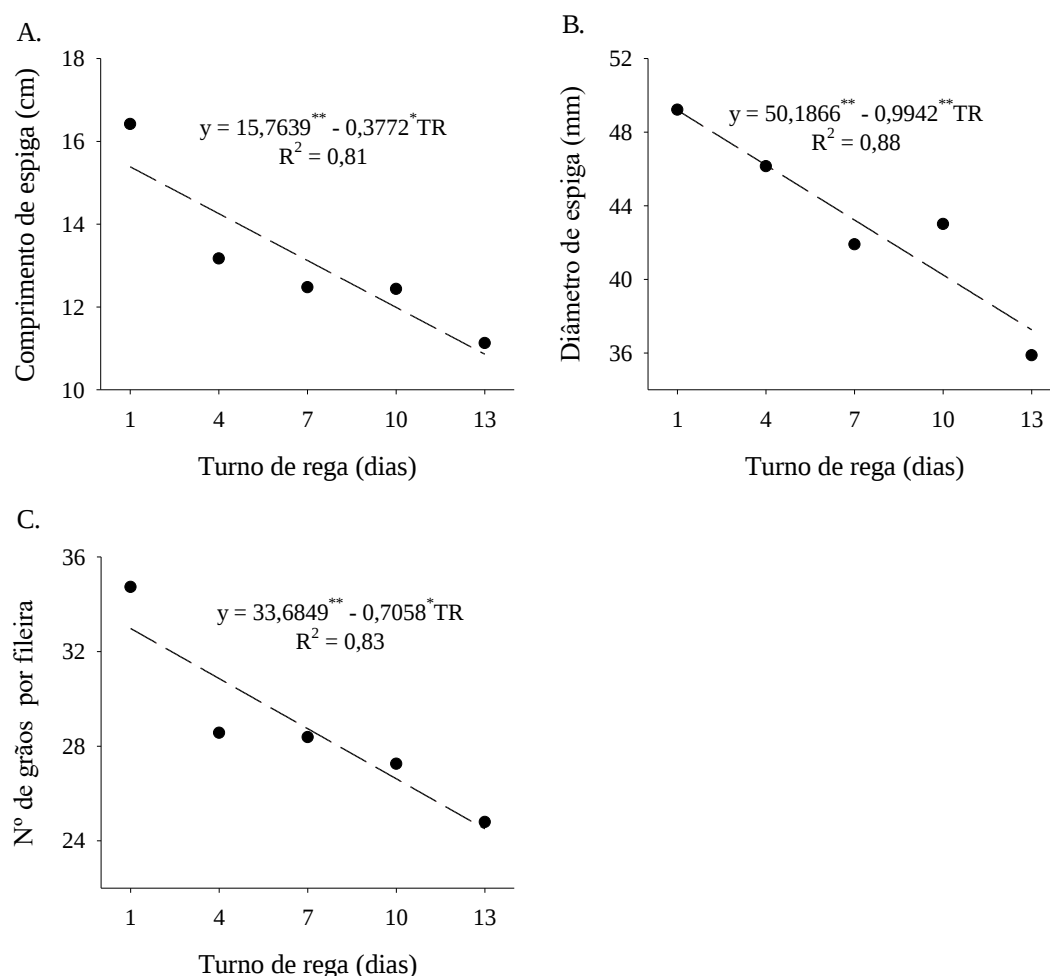


Figura 2. Efeito do estresse hídrico (turnos de rega - TR) sobre comprimento de espiga (A), diâmetro de espiga (B) e número de grãos por fileira (C) na cultura do milho em fase de grão seco cultivado no semiárido Alagoano.

O aumento dos níveis de estresse hídrico causou efeito linear redutivo no diâmetro de espiga seca (Figura 2B). Observa-se maior diâmetro (49,2 mm) no tratamento de 1 dia de TR, seguido pelo tratamento de 4 dias de TR com média de 46,2 mm, enquanto que o menor diâmetro de espiga seca foi de 37,3 mm observado no TR de 13 dias.

O número de grãos por fileira apresentou ajuste linear decrescente em função dos turnos de rega. Observa-se redução do número de grãos por fileira de 33 para 25 nas espigas tratadas com TR de 1 dia e de 13 dias, nesta ordem (Figura 2C). Essa diferença entre o menor e o maior nível de estresse hídrico é da ordem de 32%.

Sob condições de déficit hídrico, a emissão de inflorescência masculina causa atraso na emissão das espigas, quebrando o sincronismo entre emissão dos estigmas e liberação

do pólen, justificando a falha na granação e a redução da relação grão/espiga (Bergamaschi et al., 2004).

O déficit hídrico diminui o comprimento e o diâmetro da espiga do milho, assim como também o número de grãos (Hosseini, et al., 2023). Chukwudi, Mavengahama e Kutu (2022) afirmam que o estresse hídrico tem impacto significativo nos atributos de rendimento de grãos de milho. Os autores constataram que à medida que a gravidade do estresse por déficit de água aumentou, o rendimento de grãos diminuiu, em que o comprimento da espiga, diâmetro da espiga e número de grãos foram reduzidos em 79, 74 e 97%, nesta ordem, em comparação às plantas sem estresse hídrico. Ray et al. (2020) constataram diminuição no comprimento de espigas de quatro variedades de milho híbrido devido à condição de limitação hídrica.

De acordo com o Resumo da Análise de Variância (Tabela 3), houve efeito isolado significativo do fator estresse hídrico (E) sobre as variáveis número de espigas (NE) ($p < 0,05$), massa de mil grãos (MG) e produtividade de grãos (PROD) ($p < 0,01$). O fator aplicação de Si (S) acarretou efeito significativo sobre o número de espigas (NE) e sobre a produtividade de grãos (PROD), ao nível de 1% de probabilidade. Por outro lado, a interação dos fatores estudados não exerceu efeito significativo sobre nenhuma das variáveis analisadas.

Tabela 3. Resumo da Análise de Variância para as variáveis número de espigas (NE), massa de mil grãos (MG) e produtividade de grãos (PROD) avaliadas na cultura do milho, na fase de grão seco, sob déficit hídrico (turnos de rega - TR) e aplicação de silício, no semiárido Alagoano.

FV	GL	Quadrados médios		
		NE	MG	PROD
Bloco	3	138.132.754,72 ^{ns}	13.653,21 [*]	8.417.370,82 ^{**}
Estresse (E)	4	331.631.989,79 [*]	19.152,76 ^{**}	31.604.441,39 ^{**}
Silício (S)	1	204.648.116,78 ^{**}	6.885,37 ^{ns}	5.091.251,7 ^{**}
E x S	4	62.925.044,21 ^{ns}	3.533,36 ^{ns}	222.486,42 ^{ns}
CV E (%)		22,65	19,81	24,58
CV S (%)		11,81	18,69	16,65
Média Geral		44.642,81	283,96	5.089,89

FV: Fator de variação; GL: Graus de liberdade; CV: Coeficiente de variação; ^{ns}: não significativo; ^{**} e ^{*}: significativo à 1 e 5%, respectivamente, pelo teste de Fisher.

O número de espigas por hectare apresentou redução linear em função dos turnos de rega (Figura 3A). O maior número de espigas por hectare foi de 51.309,5 obtido com 1 dia de TR, seguido pelo TR de 4 dias com número de 47.976 espigas por hectare. As plantas tratadas com TR de 13 dias apresentaram menor número de espigas por hectare (37.976,2). O uso de Si proporcionou maior número de espigas por hectare em comparação à média dos tratamentos sem a aplicação do nutriente (Figura 3A), com diferença de 4.524 espigas por hectare.

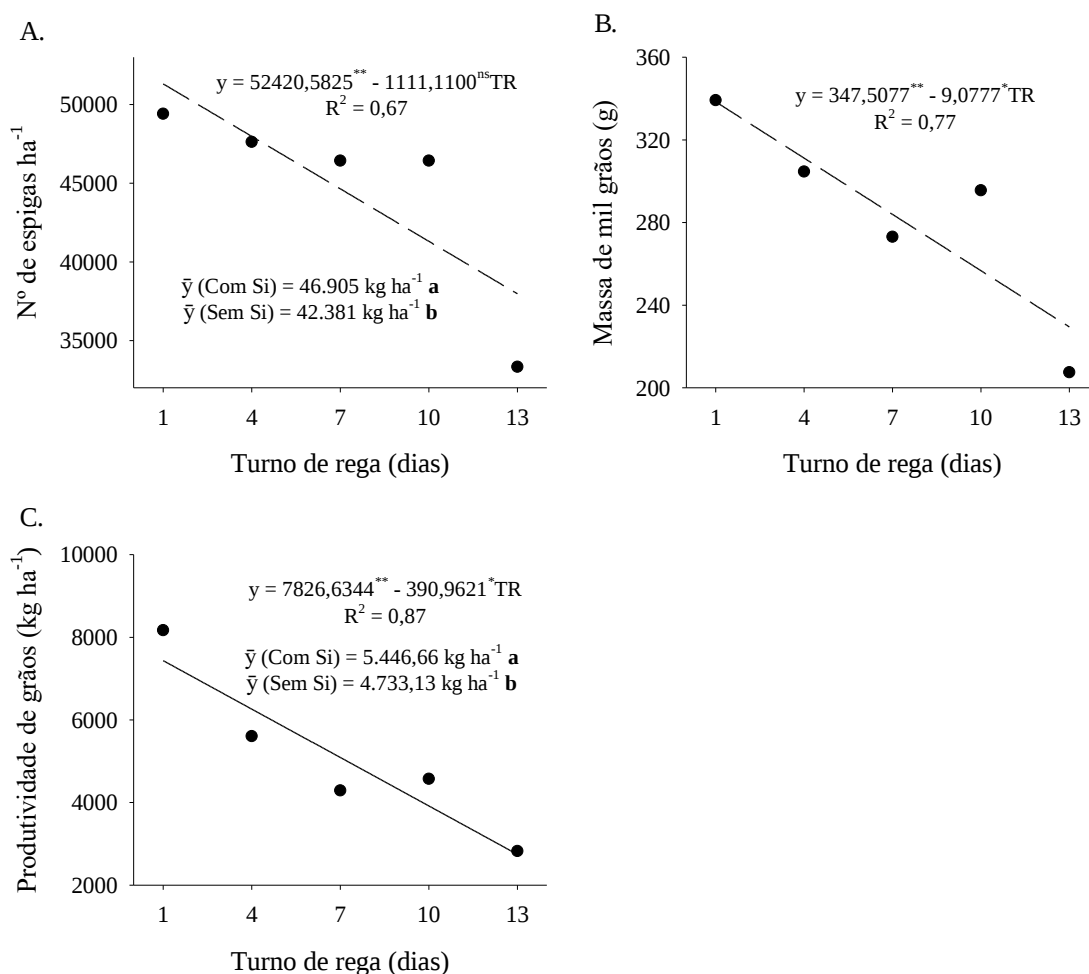


Figura 3. Efeito dos fatores estresse hídrico (turnos de rega - TR) e aplicação de silício sobre o número de espigas por hectare e produtividade de grãos (A e C, nesta ordem) e efeito isolado do estresse hídrico sobre a massa seca de mil grãos (B) no milho em fase de grão seco cultivado no semiárido Alagoano.

A massa de mil grãos apresentou redução linear com o aumento dos turnos de rega (Figura 3B). A maior massa de mil grãos foi de 338,4 kg ha^{-1} obtida com 1 dia de TR, seguido pelo tratamento de 4 dias de TR que obteve massa de mil grãos de 311,2 kg ha^{-1} .

A menor massa de mil grãos ($229,5 \text{ kg ha}^{-1}$) foi obtida com TR de 13 dias. A diferença da massa de mil grãos dos tratamentos de TR de 1 e 4 dias em relação ao TR de 13 dias foi de 47,5 e 35,6%, respectivamente.

A produtividade de grãos reduziu linearmente com o aumento dos turnos de rega (Figura 3C). Houve redução de 7.435,7 para 2.744,1 kg ha^{-1} nas plantas tratadas com TR de 1 dia e 13 dias, por essa ordem. O ajuste da regressão indica que 87% da variação na produtividade de grãos foi em função dos níveis de TR. A aplicação de Si proporcionou maior produtividade de grãos às plantas em comparação à não aplicação do nutriente, de acordo com o teste de Tukey ($p < 0,05$). Corroborando esses resultados, Araújo et al. (2022) obtiveram maior produtividade de grãos com o uso de Si em plantas de milho submetidas ao déficit hídrico em região semiárida, e observaram menor produtividade de grãos em plantas tratadas com maior nível de estresse.

Chukwudi, Mavengahama e Kutu (2022) observaram diminuição de 63% no peso de 100 grãos devido ao estresse por deficiência hídrica. Hosseini et al. (2023) também constataram diminuição no peso de 100 grãos no milho sob condições de déficit hídrico, além da perda no rendimento da espiga. Gomaa et al. (2021) afirmam que maiores intervalos de irrigação promovem perdas significativas no rendimento de grãos de milho.

O estresse hídrico afeta o crescimento, o desenvolvimento e os processos fisiológicos das plantas de milho, o que pode reduzir a produção de biomassa e, em último caso, diminuir o rendimento de grãos devido à redução no número de grãos (Traore et al., 2000). Muitos resultados experimentais já constataram redução significativa no rendimento de grãos de milho em função do estresse hídrico (Vafa et al., 2014; Sabagh et al., 2015; Ray et al., 2020).

A exposição de plantas ao déficit hídrico durante a antese reduz a fertilidade, e portanto, o número de grãos, sendo este um fator que determina o rendimento da cultura (Jamieson et al., 1995). O estresse hídrico que ocorre durante a fase de desenvolvimento inicial das sementes pode causar o aborto de grãos, resultando em menor conjunto de sementes ou no encolhimento das mesmas, levando a perdas no rendimento e na qualidade (Zörb et al., 2017).

4. CONCLUSÕES

O déficit hídrico reduziu o número de espigas verdes, a produtividade de milho verde, de grãos secos, o comprimento e o diâmetro de espigas, assim como o número de grãos por fileira.

A aplicação de Si proporcionou maior peso de espigas verdes, maior percentual de espigas verdes comercializáveis, como também maior número de espigas por hectare, e consequentemente, maior produtividade de grãos.

5. REFERÊNCIAS

- AHMED, M.; KAMRAN, A.; ASIF, M.; QADEER, U.; AHMED, Z.I.; GOYAL, A. Silicon priming: a potential source to impart abiotic stress tolerance in wheat: a review. **Australian Journal of Crop Science**, v. 7, n. 4, p. 484-491, 2013.
- ARAÚJO, V. S.; SOUSA, T. K. R.; NOBRE, R. S.; SANTOS, C. M.; NEGREIROS, K. K. S.; CARVALHO, A. C. C.; VELOSO, F. S.; VELOSO, R. C.; REZENDE, J. S. Influence of foliar application of silicon on the development and productivity of corn under water deficit in the semi-arid region of Piauí. **Research, Society and Development**, v. 11, p. e25711528051, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i5.28051.
- BARROS, J. F. C.; CALADO, J. G. **A cultura do milho**. Évora: Universidade de Évora – Departamento de Fitotecnia, 2014. 52 p.
- BAZRGAR&LRM, G.; KALAT, S. M. N.; KHAVARI&LRM, S.; KHORASANI; GHASEMI, M.; KELIDARI, A. Effect of deficit irrigation stress and plant density on antioxidant enzymes activity, compatible osmolytes, relative water content and yield of baby corn (Pashan Cultivar). **Iranian Journal of Irrigation and Drainage**, v. 15, n. 4, p. 1370-1381, 2022. DOI: 20.1001.1.20087942.1400.15.6.12.2
- BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; BERGOCI, J. I.; BIACHI, C. A. M.; MÜLLER, A. G.; COMIRAN, F.; HELCKLER, B. M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 9, p. 831-839, 2004. DOI: 10.1590/S0100-204X2004000900001.
- CHUKWUDI, U. P.; MAVENGHAHAMA, S.; KUTU, F.R. Variation in maize grain yield indices when exposed to combined heat and water stress conditions under different soil amendments. **Sustainability**, v. 14, n. 9, p. 1-16, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14095150>
- CRUZ, A. L. F.; SOARES, A. N.; CAMPOS, L. O.; GOMESESILVA, D.; FERREIRA, J. C.; GONÇALVES, F. C. M.; ARRUDA, F. P. Fontes e doses de silício modificam parâmetros produtivos de milho BRS 3046. In: Fernanda Chaves Aloisio. (Org.). **Coletânea Internacional de Pesquisa em Ciências Agrárias e Biológicas**, 2 ed.: Seven Events, v. 1, p. 57-72, 2022.

- FERREIRA, D. F. SISVAR: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Revista Brasileira de Biometria*, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019. <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>.
- GOMAA, M. A.; KANDIL, E. E.; EL-DEIN, A. A. M. Z.; ABOU-DONIA, M. E. M.; ALI, H. M.; AND ABDELSALAM, N. R. Increase maize productivity and water use efficiency through application of potassium silicate under water stress. **Scientific Reports**, v. 11, n. 224, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80656-9>
- HOSSEINI, S. G. R.; SANI, B.; MOZAFARI, H.; ZABIHI, H.; RAJABZADEH, F. Effect of silicon dioxide application and potassium levels on morphophysiological properties and storable seed yield of hybrid super sweet maize (*Zea mays* L. 'Elika') under drought stress. **Plant Soil Environment**, v. 69, n. 7, p. 324–332, 2023. <https://doi.org/10.17221/302/2022-PSE>
- JAMIESON, P. D.; MARTIN, R. J.; FRANCIS, G. S. Drought influences on grain yield of barley, wheat, and maize. **New Zeland Journal of Crop and Horticultural Science**, v. 23, n. 1, p. 55–66, 1995.
- KIM, Y. H.; KHAN, A. L.; WAQAS, M.; LEE, I. J. Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: A review. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, n. 510, 2017. <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2017.00510>. PMID:28428797.
- KIM, Y. H.; KHAN, A. L.; WAQAS, M.; SHAHZAD, R.; LEE, I. J. Silicon-mediated mitigation of wounding stress acts by up-regulating the rice antioxidant. **Cereal Research Communications**, v. 44, n. 1, p. 111-121, 2016. <http://dx.doi.org/10.1556/0806.43.2015.031>.
- LINNÉ, J. A.; CARDOSO, E. A. S.; FIGUEIREDO, V. M. A.; SILVERIO, J. M.; OLIVEIRA, T. C. C.; LIMA, V. T.; JESUS, M. V.; SCALON, S. P. Q. O silício no manejo de estresses bióticos e abióticos. In: SANTOS, C. C. **Agrobiodiversidade: Manejo e Produção Sustentável**. Vol. 2. Nova Xantina: Pantanal, 2022. p. 132-146. DOI: 10.46420/9786581460679cap10.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. Academic Press, 1995.

- MENEGALE, M. L. C.; CASTRO, G. S. A.; MANCUSO, M. A. Silício: Interação Com o Sistema Solo-Planta. **Journal of Agronomic Sciences**, v. 4, n. especial, p. 435-454, 2015.
- RAY, U. K.; SIKDER, S.; BAHADUR, M. M.; PRAMANIK, S. K. Morpho-phenological and yield responses of maize (zea mays l.) to non-irrigated water stress condition. **Journal of Science and Technology**, v. 18, p. 8-15, 2020.
- RODRIGUES, F.; MELO, P. G. S.; RESENDE, C. L. P.; MROJINSKI, F.; MENDES, R. C.; SILVA, M. A. Aptidão de híbridos de milho para o consumo in natura. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 41, n. 2, p. 484-492, 2018. <http://dx.doi.org/10.19084/RCA17216>
- SABAGH, A. E.; BARUTCULAR, C.; SANEOKA, H. Assessment of drought tolerance maize hybrids at grain growth stage in Mediterranean area. **International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering**, v. 9, n. 9, p. 1010-1013, 2015.
- SILVA, C. S.; SILVA, S.; SILVA, G. F.; SÁ, D. A.; DAMASCENO, F. F.; SOUZA, E. L.; FARIAS, T. S.; SAMPAIO, G. M.; ARAÚJO, E. R.; AND SILVA, A. A. F. Economic use of water in the cultivation of irrigated caupi beans in the semi-arid region of Brazil. **International Journal of Development Research**, v. 12, n. 12, p. 60773-60778, 2022. <https://doi.org/10.37118/ijdr.25946.12.2022>
- SILVA, G. F.; OLIVEIRA, F. H. T.; PEREIRA, R. G.; DIÓGENES, T. B. A.; NOVO JÚNIOR, J.; SOUZA FILHO, A. L. Doses de nitrogênio e de fósforo recomendadas para produção econômica de milho verde em Mossoró-RN. **Magistra**, v. 26, n. 4, p. 467-481, 2014.
- SILVA, P. S. L.; OLIVEIRA, F. H. T.; SILVA, P. I. B. Efeitos da aplicação de doses de nitrogênio e densidades de plantio sobre os rendimentos de espigas verdes e de grãos de milho. **Horticultura Brasileira**, v. 21, n. 3, p. 452-455, 2003.
- SILVA, S.; SOARES, M. A. S.; NASCIMENTO, R.; TEODORO, I.; SILVA, C. S.; COSTA, C. T. S.; CARDOSO, J. A. F.; JUNIOR, R. A. F.; LYRA, G. B.; MORAIS, M. A. F.; CUNHA, J. X. L.; AND MOURA, A. H. Physiological and productive responses of maize submitted to irrigation depths at different seasons of cultivation. **International Journal of Development Research**, v. 9, n. 12, p. 32529-32536, 2019.

- SOARES, A. N.; CRUZ, A. L. F.; CAMPOS, L. O.; SILVA, D. G.; MATOS FILHO, C. H. A.; GONÇALVES, F. C. M.; FIGUEIREDO JÚNIOR, L. G. M.; ARRUDA, F. P. Potential of silicon in the productivity and harm reduction of caterpillar-cartridge in maize plants. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 13, p. e593111335859, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i13.35859.
- TRAORE, S. B.; CARLSON, R. E.; PILCHER, C. D.; AND RICE, M. E. Bt and non-Bt maize growth and development as affected by temperature and drought stress. **Agronomy Journal**, v. 92, n. 5, p. 1027-1035, 2000.
- VAFA, P.; NASERI, R.; MORADI, M.; AND JAFARIAN, T. Evaluation of qualitative and quantitative traits of maize (cv. 604) under drought stress and plant density. **Journal of Stress Physiology and Biochemistry**, v. 10, n. 2, p. 144-154, 2014.
- WIJERATHNA-YAPA, A.; PATHIRANA, R. Sustainable Agro-Food Systems for Addressing Climate Change and Food Security. **Agriculture**, v. 12, n. 10, p. 1554, 2022. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101554>
- ZÖRB, C.; BECKER, E.; MERKT, N.; KAFKA, S.; SCHMIDT, S.; SCHMIDHALTER, U. Shift of grain protein composition in bread wheat under summer drought events. **Journal of Plant Nutrition and Soil Sciences**, v. 180, n. 1, p. 49–55, 2017. <https://doi.org/10.1002/jpln.201600367>

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados obtidos através deste estudo, conclui-se que o aumento do nível de déficit hídrico provoca redução das taxas fisiológicas das plantas de milho, reduzindo a produção de biomassa, o que implica em menor rendimento da cultura. Contudo, o uso de silício na fertilização do milho promove atenuação do efeito do déficit hídrico sobre o crescimento, nutrição mineral e componentes de produção das plantas.

Apesar da aplicação de silício ter proporcionado maior crescimento e melhor produtividade da cultura do milho nas condições deste estudo, os efeitos do uso do nutriente sobre as taxas fisiológicas não foram esclarecidos. Assim, torna-se importante que esse aspecto seja objeto de estudos futuros para melhor entendimento do efeito de redução da perda de água por plantas tratadas com aplicação de silício sob deficiência hídrica.

Outro aspecto deste estudo que pode nortear pesquisas futuras, principalmente se tratando da utilização de silício na fertilização de culturas produzidas em ambientes que possam causar estresse por deficiência hídrica, é a avaliação da aplicação do nutriente em diferentes doses.

Os resultados alcançados neste estudo reiteram a importância do uso do silício em cultivos de milho em ambientes que promovem a redução da produção por ocasionar o estresse por deficiência hídrica, como é o caso da região do Semiárido alagoano em condições de cultivo de sequeiro. Contudo, maiores estudos devem ser realizados para investigar os efeitos atenuantes do silício, incluindo outras culturas de importância socioeconômica no país.