

JAMILES CARVALHO GONÇALVES DE SOUZA HENRIQUE

SORGO FORRAGEIRO SOB FERTILIZAÇÃO NITROGENADA E MOLIBDICA
EM CONDIÇÕES DE IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA NO SEMIÁRIDO
PERNAMBUCANO

Serra Talhada-PE

2024

**H
E
N
R
I
Q
U
E**

**J
C
G
S**

**A
T
I
V
I
D
A
D
E
E
N
Z
I
M
Á
T
I
C
A
·
·
·
2
0
2
4**

JAMILES CARVALHO GONÇALVES DE SOUZA HENRIQUE

SORGO FORRAGEIRO SOB FERTILIZAÇÃO NITROGENADA E MOLIBDICA EM
CONDIÇÕES DE IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA NO SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Campelo de Oliveira

Co-orientador: Prof. Dr. Thieres George Freire da Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Evaristo Jorge Oliveira de Souza

Serra Talhada-PE

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

H519s

Henrique, Jamiles

SORGO FORRAGEIRO SOB FERTILIZAÇÃO NITROGENADA E MOLIBDICA EM CONDIÇÕES DE IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA NO SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO / Jamiles Henrique. - 2024.
93 f. : il.

Orientador: Alexandre Campelo de Oliveira.
Coorientador: Thieres George Freire da Silva.
Inclui referências, apêndice(s) e anexo(s).

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Serra Talhada, 2024.

1. Sorghum bicolor. 2. estresse hídrico. 3. ureia. 4. molibdato de sódio. 5. danos oxidativos. I. Oliveira, Alexandre Campelo de, orient. II. Silva, Thieres George Freire da, coorient. III. Título

CDD 581.15

JAMILES CARVALHO GONÇALVES DE SOUZA HENRIQUE

SORGO FORRAGEIRO SOB FERTILIZAÇÃO NITROGENADA E MOLIBDICA EM
CONDIÇÕES DE IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA NO SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

APROVADO em 23 / 02 / 2024

Banca Examinadora

Prof. Dr. Alexandre Campelo de Oliveira– UAST/UFRPE

Orientador

Prof. Dr. Fernando José Freire – SEDE/UFRPE

Examinador Externo

Dr. Denizard Oresca - DTI

Examinador Externo

Aos meus pais, Cristiane Carvalho e Iranildo Gonçalves, e esposo, Lucas Henrique cujo amor, apoio e sacrifício tornaram possível a realização deste sonho.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus que sempre esteve comigo em todos os momentos me concedendo sabedoria e forças para prosseguir.

A toda minha família que sempre acreditou e torceu por mim, em especial, ao meu esposo Lucas Henrique, meus pais Iranildo Gonçalves e Cristiane Carvalho, aos meus irmãos Izabel Cristina, Natanael, Rafaela, Juliana e Crislaine e aos meus sobrinhos Ana Júlia, Maria Eduarda, Maria Clara, Daniele, Emily, Guilherme, Davi, Wendel e Heitor, que sempre foram fonte de auxílio e amparo nas situações mais difíceis da caminhada me proporcionando momentos felizes.

Aos meus amigos do mestrado, Glícia, David, Marcos, Rodrigo, Wilma e Iara que me proporcionaram momentos incríveis, e aos meus amigos de longas datas, Lucca, Daniela, Cinthia, Kayla, Anderson, Cibele e Welisson, que mesmo distantes sempre me apoiaram.

Aos meus orientadores Alexandre Campelo e Thieres Freire, por sempre acreditar e confiar em mim, e pelo conhecimento e sabedoria concedido ao longo dessa jornada.

A todos os integrantes do grupo NutriPlant, em especial Gabriel, Ednaete, Náthaly, Maria Gabriela e Cristina, pelo apoio nas atividades em campo e laboratório.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UFRPE/UAST) e ao Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal (PGPV) pela preciosa oportunidade e por fazer parte de mais uma etapa importante da minha vida profissional.

A banca, pelas críticas construtivas, disponibilidade e a atenção a mim cedida.

“Até aqui nos ajudou o SENHOR”

(1 Samuel 7:12)

RESUMO GERAL

A escassez hídrica, atrelada a elevadas temperaturas, constituem um dos principais fatores na limitação da produtividade das culturas em regiões semiáridas. No entanto, técnicas de suplementação nutricional com nitrogênio e molibdênio podem proporcionar incrementos positivos na produção dessas culturas. Com isso, objetivou-se avaliar o efeito de doses crescentes de nitrogênio na presença e/ou ausência de molibdênio na atividade de enzimas antioxidantes e incremento produtivo do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico no semiárido. O experimento foi conduzido em condições de campo, utilizando o delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições, arranjos em esquema fatorial 5 x 2 x 3, referentes a cinco doses de nitrogênio (ureia): 0, 50, 100, 150, 300 kg ha⁻¹, duas doses de molibdênio (molibdato de sódio): 0 e 160 g ha⁻¹ e três ciclos de produção. Ao final de cada ciclo, foram avaliadas a atividade de enzimas antioxidantes (Dismutase peroxidase (SOD), ascorbato peroxidase (APX) e catalase (CAT)), extração e teores de nitrogênio total (Nt), molibdênio (Mo), potássio (K), cloreto (Cl), condutância estomática (*gs*), eficiência no uso da água (EUA) e produção de massa verde (MV) e seca (MS). A maior atividade enzimática da CAT ocorreu na interação doses de N e Mo, com maior atividade na dosagem de 300 kg ha⁻¹ de N e 160 g ha⁻¹ de Mo. As maiores produtividades de MV (46,28 Mg ha⁻¹), MS (18,9 Mg ha⁻¹) e EUA (5,34 kg/ m³) ocorreram na maior dosagem de N (300 Kg ha⁻¹ N). Os maiores teores e extração de N total, Mo, Cl e K foram encontrados na rebrota 2 e na maior dose de N (300 kg ha⁻¹). O N mitigou os efeitos deletérios ocasionado pelo déficit hídrico no sorgo. As condições meteorológicas dos ciclos influenciaram fortemente nos teores e extração dos nutrientes. As doses de N proporcionaram aumento nas variáveis de produção.

Palavras-chave: *Sorghum bicolor*, estresse hídrico, ureia, molibdato de sódio, danos oxidativos.

GENERAL ABSTRACT

Water scarcity, coupled with high temperatures, is one of the main factors limiting crop productivity in semi-arid regions. However, nutritional supplementation techniques with nitrogen and molybdenum can provide positive increases in the production of these crops. Thus, the objective was to evaluate the effect of increasing doses of nitrogen in the presence and/or absence of molybdenum on the activity of antioxidant enzymes and the productive increment of forage sorghum subjected to water deficit in the semi-arid region. The experiment was conducted under field conditions, using a randomized block design, with four replications, arranged in a 5 x 2 x 3 factorial scheme, referring to five doses of nitrogen (urea): 0, 50, 100, 150, 300 kg ha⁻¹, two doses of molybdenum (sodium molybdate): 0 and 160 g ha⁻¹, and three production cycles. At the end of each cycle, the activity of antioxidant enzymes (Superoxide Dismutase (SOD), Ascorbate Peroxidase (APX), and Catalase (CAT)), extraction and contents of total nitrogen (Nt), molybdenum (Mo), potassium (K), chloride (Cl), stomatal conductance (gs), water use efficiency (EUA), and production of green mass (MV) and dry mass (MS) were evaluated. The highest enzymatic activity of CAT occurred in the interaction of N and Mo doses, with higher activity at the dosage of 300 kg ha⁻¹ of N and 160 g ha⁻¹ of Mo. The highest yields of MV (46.28 Mg ha⁻¹), MS (18.9 Mg ha⁻¹), and EUA (5.34 kg/m³) occurred at the highest N dosage (300 kg ha⁻¹ N). The highest contents and extraction of total N, Mo, Cl, and K were found in regrowth 2 and at the highest N dose (300 kg ha⁻¹). Nitrogen mitigated the deleterious effects caused by water deficit in sorghum. The meteorological conditions of the cycles strongly influenced the contents and extraction of nutrients. The N doses provided an increase in production variables.

Keywords: *Sorghum bicolor*, water stress, urea, sodium molybdate, oxidative damage.

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIACÕES

Nitrogênio	N
Molibdênio	Mo
Potássio	K ⁺
Cloreto	Cl ⁻
Massa Frescas	MF
Massa seca	MS
Eficiência do uso da gua	EUA
Eficiência do uso do nitrogênio	EUN
Catalase	CA
Ascorbato Peroxidase	APX
Superóxido Dismutase	SOD

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 - PAPEL CRUCIAL DA INTERAÇÃO ENTRE NITROGÊNIO E MOLIBDÊNIO NOS CULTIVOS DO SEMIÁRIDO: UMA REVISÃO

Figura 1. Mapa da distribuição das regiões áridas e semiáridas no mundo (Fonte: Bernal, 2007) ..	24
Figura 2. Mecanismo de adaptação à salinidade via suplementação nitrogenada. (Fonte: Autores, 2024)	26
Figura 3. Representação do processo metabólico de vegetais (a) com habilidade para reduzir os efeitos negativos do estresse oxidativo através de antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos, e vegetais (b) com níveis elevados de dano oxidativo nos lipídios como resposta à formação de espécies reativas de oxigênio (ERO). (Fonte: Lanza and Reis, 2021)	26
Figura 4. Reação de Fixação Biológica do Nitrogênio (FBN) atmosférico (Fonte: Adaptado de RAVEN et al., 1996).....	28
Figura 5. Classificação e fontes dos fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada. NBTP = n-(n- butil) tiofosfórico triamida; DMPP=3,4 dimetilpirazol fosfato. (Fonte: Adaptado de Guelfi, 2017)	30
Figura 6. Exemplos de variabilidade nas dosagens de molibdênio em diferentes condições de cultivos (Fonte: Autores, 2024)	32
Figura 7. Métodos utilizados para o monitoramento da fertilidade do solo e nutrição da planta. Sintomas visuais de deficiência (A), Amostragem de solo (B), Análise de tecido (C), Monitoramento com sensoriamento remoto de lavouras (D) e Sensores In Situ (E) (Fonte: Autores, 2024).....	33
Figura 8. Relação entre disponibilidade de nutrientes e pH do solo. (Fonte: Malavolta, 1979).....	35
Figura 9. Esquema com sistema de rotação de cultivos eficientes. Cultivo principal com milho = Cultura antecessora: Feijão, soja e aveia preta; Cultura sucessora: Canola e girassol (A); Cultivo principal com soja = Cultura antecessora: Milho, trigo e aveia preta; Cultura sucessora: Tremoço e girassol (B) (Fonte: Autores, 2024)	36

CAPÍTULO 2 - ATIVIDADE ENZIMÁTICA E INCREMENTOS PRODUTIVOS DO SORGO FORRAGEIRO SOB DÉFICIT HÍDRICO E ADUBAÇÃO NITROGENADA E MOLIBDICA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Figura 1. Localização da área experimental na Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Serra Talhada - PE, Brasil. (Fonte: Autores, 2024).....	52
Figura 2. Valores de precipitação pluviométrica, temperatura média e umidade relativa média do ar durante os ciclos consecutivos de cultivo do sorgo forrageiro (cv. SF 15) submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio e molibdênio.....	53

Figura 3. Altura de planta (AP) (A) e comprimento de folhas (CF)(B) em ciclos consecutivos do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio e molibdênio no semiárido brasileiro.....	58
Figura 4. Massa verde (MV) (A), massa seca (MS)(B) e eficiência do uso da água (EUA)(C) e eficiência do uso de nitrogênio (EUN) (D) em ciclos consecutivos do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio e molibdênio.....	60
Figura 5. Teor de nitrogênio total (NT), molibdênio (Mo) e cloreto (Cl ⁻) em ciclos consecutivos do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio e molibdênio.....	62
Figura 6. Extração de nitrogênio total (Nt), molibdênio (Mo) e cloreto (Cl) em ciclos consecutivos do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio e molibdênio.....	64
Figura 7. Atividade enzimática da catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX) em ciclos consecutivos do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio e molibdênio..	67
Figura 8. Representação gráfica da relação entre as variáveis (A), crescimento (AP, AF e NFV), produtividade (MS, EUN e EUA), avaliação nutricional (teor e extração de N total, Mo, Cl ⁻ e K), condutância estomática (gs) e atividade das enzimas antioxidantes (CAT, APX e SOD) do sorgo forrageiro submetido a deficit hidrico e o manejo da adubação nitrogenada (0; 50; 100; 150 e 300 kg ha ⁻¹) e molibdica (0 e 160 g ha ⁻¹) (B). Os simbolos verdes representam as variaveis e o manejo no CP1, enquanto os vermelhos as variaveis e o manejo no CP2.....	69

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 - PAPEL CRUCIAL DA INTERAÇÃO ENTRE NITROGÊNIO E MOLIBDÊNIO NOS CULTIVOS DO SEMIÁRIDO: UMA REVISÃO

Tabela 1. Diferentes métodos de manejo com fertilização nitrogenada em culturas comumente cultivadas em regiões semiáridas do Brasil e do mundo (Fonte: Autores, 2024)	31
Tabela 2. Valores médios de crescimento em ciclos consecutivos do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio e molibdênio.	67
Tabela 3. Valores médios de produtividade em ciclos consecutivos do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio e molibdênio. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Letras minúsculas se referem as doses de N e Mo e maiúscula aos ciclos.	69
Tabela 4. Teor de nutrientes em ciclos consecutivos do sorgo forrageiro submetido a déficit	71
Tabela 5. Extração de nutrientes em ciclos consecutivos do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio e molibdênio.	73
Tabela 6. Condutância estomática (gs) em ciclos consecutivos do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio e molibdênio.	74
Tabela 7. Atividade enzimática da catalase (CAT) em ciclos consecutivos do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio e molibdênio.	Error! Bookmark not defined.

CAPÍTULO 2 – ATIVIDADE ENZIMÁTICA E INCREMENTOS PRODUTIVOS DO SORGO FORRAGEIRO SOB DÉFICIT HÍDRICO E ADUBAÇÃO NITROGENADA E MOLIBDICA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Tabela 1. Resultados da análise química e física do solo coletado de 0 a 40 cm antes da instalação do experimento, Serra Talhada, PE.....	53
Tabela 2. Valores médios de crescimento em ciclos consecutivos do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio e molibdênio.	59
Tabela 3. Valores médios de produtividade em ciclos consecutivos do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio e molibdênio. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Letras minúsculas se referem as doses de N e Mo e maiúscula aos ciclos.	61
Tabela 4. Teor de nutrientes em ciclos consecutivos do sorgo forrageiro submetido a déficit	62
Tabela 5. Extração de nutrientes em ciclos consecutivos do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio e molibdênio.	65

Tabela 6. Condutância estomática (gs) em ciclos consecutivos do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio e molibdênio.	66
Tabela 7. Atividade enzimática da catalase (CAT) em ciclos consecutivos do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio e molibdênio.	68

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	18
CAPITULO 1: PAPEL CRUCIAL DA INTERAÇÃO ENTRE NITROGÊNIO E MOLIBDÊNIO NOS CULTIVOS DO SEMIÁRIDO: UMA REVISÃO	20
1. INTRODUÇÃO	21
2. METODOLOGIA	23
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	24
3.1 IMPORTÂNCIA DA NUTRIÇÃO PARA PLANTAS NO SEMIÁRIDO	24
3.2 EFEITOS DA ADUBAÇÃO NITROGENADA E MOLIBDICA NO DESENVOLVIMENTO VEGETAL	27
3.3 ESTRATÉGIAS DE MANEJO PARA OTIMIZAR A UTILIZAÇÃO DO NITROGÊNIO E MOLIBDÊNIO	29
3.3.1 Fornecimento Adequado de Nitrogênio (N)	29
3.3.2 Fertilização com Molibdênio (Mo)	31
3.3.3 Monitoramento dos nutrientes: Teor de molibdênio e nitrogênio no solo e planta	32
3.3.4 Ajuste do pH do solo.....	34
3.3.5 Inoculação com Microrganismos	35
3.3.6 Rotação de Culturas	36
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
CAPITULO 2: ATIVIDADE ENZIMÁTICA E INCREMENTOS PRODUTIVOS DO SORGO FORRAGEIRO SOB DÉFICIT HÍDRICO E ADUBAÇÃO NITROGENADA E MOLIBDICA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO	56
1. INTRODUÇÃO	57
2. MATERIAIS E MÉTODOS	59
2.1 Área de estudo.....	59
2.2 Caracterização do clima e solo.....	59
2.3 Implantação da cultura e aplicação dos tratamentos	61
2.4 Manejo da irrigação deficitária	62
2.5 Análises	63

2.5.1 Avaliações biométricas	63
2.6 Produtividade	63
2.7 Avaliação nutricional	64
2.8 Avaliação fisiológica.....	64
2.8.1 Condutância estomática (gs)	64
2.9 Avaliação bioquímica	64
2.9.1 Atividade das enzimas antioxidantes: Catalase (CAT), Ascorbato peroxidase (APX) e superóxido dismutase (SOD)	64
2.10 Design experimental	65
2.11 Análise Estatística	65
3. RESULTADOS	66
3.1 Variáveis biométricas.....	66
3.2 Produtividade	68
3.3 Avaliação nutricional	70
3.3.1 Teor de nitrogênio total (Nt), molibdênio (Mo), cloreto (Cl) e potássio (K).....	70
3.4 Extração de nitrogênio total (Nt), molibdênio (Mo), cloreto (Cl) e potássio (K)	72
3.5 Resposta fisiológica	74
3.5.1 Condutância estomática (gs)	74
3.6 Resposta bioquímica	75
3.6.1 Atividade enzimática: Catalase (CAT), Ascorbato peroxidase (APX), Peroxidase dismutase (SOD).....	75
4. DISCUSSÃO	78
4.1 Doses de nitrogênio e ciclos consecutivos influenciam nas variáveis biométricas do sorgo forrageiro sob déficit hídrico.....	79
4.2 Doses de nitrogênio e ciclos consecutivos do sorgo forrageiro proporcionaram incrementos na produção de MS, MV, EUA e EUN sob déficit hídrico	79
4.3 Teor e extração de nutrientes são influenciados pelas doses de N e ciclos consecutivos do sorgo	81
4.4 Ausência de Mo e N promoveram maiores aberturas estomáticas (gs)	83

4.5 A atividade das enzimas antioxidantes foram afetadas pelos ciclos e adubação nitrogenada e molibdica.....	84
5. CONCLUSÃO.....	85
7. REFERÊNCIAS	86

APRESENTAÇÃO

A região semiárida, caracterizada por sua escassez de água e condições climáticas adversas, demanda estratégias agrícolas inovadoras para assegurar a produtividade e a sustentabilidade das culturas. Nesse cenário desafiador, o cultivo de sorgo emerge como uma das principais fontes de alimento e forragem, devido à sua adaptabilidade às condições de seca.

No entanto, a eficiência da produção de sorgo na região semiárida é fortemente comprometida pelo déficit hídrico recorrente, afetando não apenas a quantidade, mas também a qualidade dos rendimentos. Diante desse desafio, estratégias de adubação nitrogenada e molibdica despontam como áreas de estudo críticas para otimizar a tolerância do sorgo ao estresse hídrico.

As técnicas de suplementação nutricional com nitrogênio, reconhecido por seu papel fundamental no crescimento vegetativo e na produtividade das culturas, ganham uma nova dimensão ao serem aplicadas no contexto de escassez hídrica. A adubação nitrogenada, surge como uma ferramenta fundamental, pois, além de atenuar a ação danosa do estresse hídrico, interfere diretamente no crescimento e desenvolvimento das plantas. Esse nutriente desempenha um papel essencial na síntese de proteínas, na fotossíntese e no metabolismo das plantas, influenciando diretamente a produtividade das culturas.

Em paralelo, o molibdênio, embora muitas vezes subestimado, emerge como um componente crítico na absorção e na utilização eficiente do nitrogênio pelas plantas. Sua função como cofator enzimático na assimilação e fixação biológica de nitrogênio (FBN) o torna um elemento chave para a maximização do uso do nitrogênio disponível, especialmente em ambientes de déficit hídrico.

Sendo assim, estudos sobre a compreensão da interação entre a adubação nitrogenada e molibdica em ambientes de déficit hídrico são essenciais para promover estratégias de manejo agrícola que otimizem o crescimento e desenvolvimento de culturas como o sorgo, mesmo diante de condições ambientais adversas.

CAPITULO 1: PAPEL CRUCIAL DA INTERAÇÃO ENTRE NITROGÊNIO E MOLIBDÊNIO NOS CULTIVOS DO SEMIÁRIDO: UMA REVISÃO

RESUMO: O ambiente semiárido é caracterizado pelas elevadas temperaturas e baixas precipitações. Essas características influenciam em fatores como limitação hídrica, salinidade do solo e água, estresse térmico e irregularidade na disponibilidade de nutrientes no solo, tornando esse ambiente desafiador para os cultivos agrícolas. No entanto, técnicas de manejos como a suplementação nutricional podem surgir como uma estratégia promissora para otimizar a produção agrícola e garantir a segurança alimentar nessas condições adversas. Entre os principais nutrientes exigidos pelas culturas, destaca-se o nitrogênio (N). O N é um macronutriente fundamental para a síntese de compostos vitais pois confere maior tolerância às plantas a fatores abióticos e bióticos, promovendo assim o crescimento e desenvolvimento vegetal. Para que o N possa ser fixado ou assimilado, é necessário a presença do micronutriente molibdênio (Mo). O Mo atua como cofator enzimático essencial para processos-chave, como a fixação biológica de nitrogênio (FBN), atuando na enzima nitrogenase, e na assimilação de N, agindo na enzima redutase do nitrato. Nesse sentido, o objetivo dessa revisão é abordar sobre a importância da interação sinérgica entre nitrogênio e molibdênio nos cultivos agrícolas das regiões semiáridas. Para a elaboração desse estudo, foram realizadas buscas sistemáticas de artigos científicos de alto impacto nas bases de dados acadêmicas, com espaço temporal de 8 anos. Concluiu-se que o manejo adequado com nitrogênio e molibdênio é crucial para elevar os rendimentos das culturas do semiárido, no entanto, para que o nitrogênio possa ser utilizado de forma eficaz é necessário o fornecimento adequado de molibdênio no solo ou via foliar das plantas.

Palavras-chave: Manejo nutricional; nitrato, molibdato, adaptação de culturas; regiões semiáridas; estratégias de cultivos.

ABSTRACT: The semi-arid environment is characterized by high temperatures and low precipitation. These characteristics influence factors such as water limitation, soil and water salinity, thermal stress, and irregularity in the availability of nutrients in the soil, making this environment challenging for agricultural crops. However, management techniques such as nutritional supplementation can emerge as a promising strategy to optimize agricultural production and ensure food security under these adverse conditions. Among the main nutrients required by crops, nitrogen (N) stands out. N is a fundamental macronutrient for the synthesis of vital compounds as it confers greater tolerance to plants against abiotic and biotic factors, thus promoting plant growth and development. For N to be fixed or assimilated, the presence of the micronutrient molybdenum (Mo) is necessary. Mo acts as an essential enzymatic cofactor for key processes, such as biological nitrogen

fixation (BNF), acting on the enzyme nitrogenase, and in N assimilation, acting on the nitrate reductase enzyme. In this sense, the objective of this review is to address the importance of the synergistic interaction between nitrogen and molybdenum in agricultural crops in semi-arid regions. For the elaboration of this study, systematic searches for high-impact scientific articles were carried out in academic databases, with a temporal span of 8 years. It was concluded that proper management with nitrogen and molybdenum is crucial to increase the yields of crops in the semi-arid region; however, for nitrogen to be used effectively, adequate molybdenum supply in the soil or via foliar application to plants is necessary.

Keywords: Nutritional management; nitrate, molybdate, crop adaptation; semi-arid regions; crop strategies.

1. INTRODUÇÃO

O semiárido é caracterizado por suas elevadas temperaturas e baixa precipitação, tornando-se um ambiente desafiador para as atividades agrícolas, que enfrentam restrições significativas ao crescimento e desenvolvimento das plantas (Yang et al., 2023). A limitação hídrica, salinidade da água e do solo, estresse térmico e a disponibilidade irregular de nutrientes no solo, são os fatores abióticos que mais prejudicam os cultivos agrícolas nessas regiões, afetando diretamente no crescimento e desenvolvimento das culturas (Hadebe et al., 2017; Gul et al., 2022; Serna, 2022).

Nesse cenário desafiador, a utilização de técnicas de manejo que promovam maior tolerância as plantas, é essencial para amenizar os danos ocasionados por esses fatores, entre essas técnicas destaca-se a suplementação nutricional com N e Mo. A interação entre esses nutrientes desempenha um papel fundamental em todo o ciclo das plantas, sendo essenciais para uma série de processos vitais que afetam diretamente o crescimento, desenvolvimento e metabolismo dos vegetais (Pascale et al., 2018; Kumar et al., 2021; Oliveira et al., 2022).

O N, um dos elementos primários na composição dos compostos orgânicos, é vital para a síntese de proteínas, aminoácidos e ácidos nucleicos, desempenhando um papel crucial no crescimento vegetal e na resposta ao estresse (Choi et al., 2023; Nazir et al., 2023). Como um dos nutrientes mais essenciais para as culturas agrícolas, esse macronutriente exerce um impacto direto na alocação de fotossimilados tanto nas partes vegetativas quanto nas reprodutivas das plantas (Muratore et al., 2021; Choi et al., 2023; Peralta-Sánchez et al., 2023).

Essa influência resulta em alterações fisiológicas e morfológicas, estando intimamente relacionada com os processos de fotossíntese, desenvolvimento do sistema radicular, absorção iônica de nutrientes e crescimento celular (Lyzenga et al., 2023; Zhang et al., 2023a). Estudos recentes,

demonstram que fertilização nitrogenada confere maior resistência às plantas em ambientes de escassez hídrica (Naghdyzadegan et al., 2023), de temperaturas elevadas e baixas (Li et al., 2023; Soualiou et al., 2023) e de salinidade (Abdelkhalik et al., 2023; Sardar et al., 2023).

Dada a importância do N para o desenvolvimento das plantas, a dinâmica de assimilação e fixação biológica desse elemento, é crucial considerar a contribuição de um micronutriente fundamental em seu metabolismo, o molibdênio (Mo). O Mo, embora necessário em quantidades mínimas, desempenha um papel significativo no metabolismo do nitrogênio nas plantas, sendo um componente essencial das enzimas nitrogenase, responsáveis pela fixação biológica do nitrogênio (FBN) pelas rizóbios, e nitrato redutase, responsáveis pela redução do nitrato (NO₃⁻) a nitrito (NO₂⁻), além de atuar em outras reações metabólicas cruciais para o desenvolvimento das plantas (Biełło et al., 2023). Assim, a deficiência desse micronutriente pode comprometer o metabolismo do nitrogênio, resultando em uma redução na capacidade produtiva das culturas (Nie et al., 2016; Gopal e Shukla., 2017; Tokasheva et al., 2021).

Diversos estudos apontam para uma interação sinérgica entre esses dois nutrientes, uma vez que o Mo desempenha uma função crucial na atividade de enzimas associadas ao metabolismo do N (Banerjee et al., 2021; Mendel, 2022; Alam et al., 2023). Essa sinergia não apenas impacta o crescimento e o desenvolvimento das plantas, mas também influencia em sua capacidade de enfrentar condições ambientais adversas e estresses diversos, tanto de natureza biótica quanto abiótica (Sajjad et al., 2021; Heshmat et al., 2021).

Assim, a compreensão profunda da interação entre o N e o Mo torna-se essencial para otimizar o rendimento e promover a sustentabilidade das plantas em ambientes diversos, incentivando a adoção de estratégias nutricionais mais eficientes e práticas agrícolas mais sustentáveis, a fim de aumentar a produtividade das culturas agrícolas e sua adaptação em ambientes semiáridos (exemplos, Feng et al., 2024; Santos et al., 2019; Mao et al., 2018; Santos et al., 2018; Bazzo et al., 2018; Imran et al., 2019)

Nesse sentido, ao examinar a importância funcional desses nutrientes, suas inter-relações e o seu impacto no desenvolvimento e produtividade das culturas, este estudo tem como objetivo fornecer uma visão detalhada das práticas de manejo nutricional com nitrogênio e molibdênio para otimizar o potencial produtivo das culturas em ambientes semiáridos.

2. METODOLOGIA

O estudo em questão foi realizado através de uma revisão de literatura do tipo narrativa, com o objetivo de analisar criticamente os estudos existentes sobre técnicas de adubação com o nitrogênio e molibdênio para os cultivos em regiões semiáridas. Buscou-se identificar as tendências emergentes, lacunas nas pesquisas e as implicações práticas para produtores e profissionais da área.

Foram estabelecidos critérios de inclusão para artigos publicados nos últimos 8 anos (2016 a 2024) em periódicos revisados por pares. Foram incluídos também estudos que abordam diretamente a aplicação do manejo nutricional com nitrogênio e molibdênio em ambientes de estresses. Além disso, foram descartados trabalhos que não apresentaram uma metodologia clara ou que não se relacionaram diretamente ao tema proposto.

Para a elaboração do estudo, foi realizada uma busca sistemática de artigos científicos de alto impacto em português, inglês e espanhol nas bases de dados acadêmicas, incluindo Portal de periódicos Capes, Google Acadêmico e Scientific Electronic Library Online (SCIELO), utilizando-se termos como: Cultivos agrícolas nas regiões semiáridas, importância da nutrição de plantas; culturas do semiárido; adubação nitrogenada: constituintes de aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos, clorofilas; adubação molibdic, fixação biológica de nitrogênio (FBN), assimilação de nitrogênio, formas de molibdênio e nitrogênio no solo, adubação nitrogenada na produção de biomassa e fertilidade do solo.

Do total de 545 trabalhos identificados inicialmente, realizou-se uma triagem inicial com base nos títulos e resumos. Em seguida, foram aplicados os critérios de inclusão e exclusão para reduzir a lista para 164 estudos. A seleção final dos trabalhos foi realizada através de uma leitura completa dos materiais, avaliando a qualidade metodológica dos estudos incluídos através da utilização de um conjunto de critérios adaptados de instrumentos de avaliação já existentes. Foram considerados a validade dos estudos, a representatividade das amostras, e a clareza na apresentação dos resultados.

Os estudos foram organizados em categorias temáticas, com o intuito de analisar cada categoria separadamente para identificar padrões e discrepâncias nos resultados. Após a organização das categorias, foi realizada uma análise qualitativa dos dados, destacando as principais conclusões de cada estudo e relacionando-as aos objetivos da revisão.

Após a seleção rigorosa dos artigos científicos, iniciou-se a elaboração desse estudo com o intuito de trazer esclarecimento sobre a importância de técnicas de adubação com o nitrogênio e molibdênio para as culturas de regiões semiáridas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por meio de uma pesquisa bibliográfica rigorosa, que envolveu a análise de 545 trabalhos, incluindo artigos científicos e de revisão, teses de doutorado e livros foram selecionados 163 trabalhos para compor esta revisão. Esses trabalhos foram escolhidos com base em sua publicação em periódicos com ausência, médio e alto fator de impacto, e de Qualis B1 a A1.

Sendo assim, os trabalhos foram estruturados conforme os temas, resultando em: 10 estudos sobre os ambientes semiáridos no mundo, 29 trabalhos abordando a importância da nutrição de plantas, 30 estudos sobre o impacto da adubação nitrogenada nas culturas do semiárido, 30 abordando o impacto da adubação molibdica nas culturas do semiárido, 24 pesquisas relacionadas a técnicas de adubação, e, por fim, 40 estudos concentrados na aplicação de manejo nutricionais com nitrogênio e molibdênio em ambientes semiáridos .

3.1 IMPORTÂNCIA DA NUTRIÇÃO PARA PLANTAS NO SEMIÁRIDO

As regiões semiáridas compreendem amplas áreas ao redor do mundo, variando em tamanho e localização geográfica (Figura 1). Essas regiões são caracterizadas como ambientes críticos, com altas temperaturas, baixa umidade e chuvas irregulares, dificultando o desenvolvimento saudável das plantas (Scholes, 2020 e Yang et al., 2023). Em um cenário onde a água é um recurso escasso e as condições climáticas impõem estresse hídrico, a compreensão e aplicação eficaz de estratégias de nutrição para plantas tornam-se cruciais para promover a sustentabilidade agrícola e garantir a produção alimentar nessas regiões.

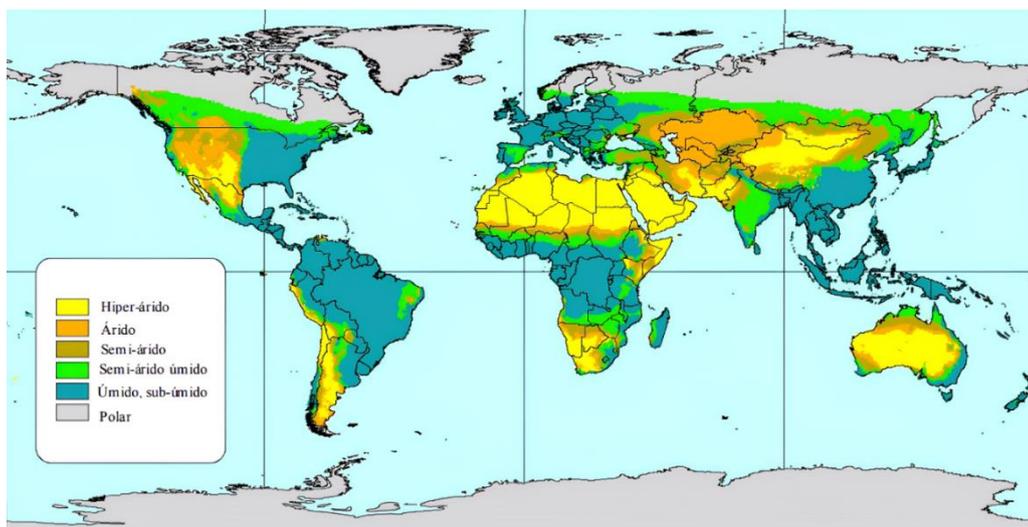


Figura 1. Mapa da distribuição das regiões áridas e semiáridas no mundo (Fonte: Bernal, 2007)

A nutrição vegetal desempenha um papel vital na fisiologia e no metabolismo das plantas, influenciando diretamente no seu crescimento, desenvolvimento e, por conseguinte, o rendimento das culturas (Hasanuzzaman et al., 2018; Muratore et al., 2021).

Em ambientes semiáridos, a capacidade das plantas em absorver nutrientes essenciais do solo e utilizar esses elementos de maneira eficiente torna-se ainda mais crucial (Alsharif et al., 2020; Wang et al., 2022), uma vez que essa capacidade pode beneficiar a planta de várias maneiras como, proporcionar maior eficiência na utilização da água pela planta (Tavakol et al., 2018; Santos et al., 2020), aumento da tolerância ao estresse hídrico e térmico (Xiaochuang et al., 2019; Merajipoor et al., 2020), melhoria da fisiologia vegetal (Selim et al., 2019; Hemida et al., 2022), redução na suscetibilidades a pragas e doenças (Fernández-Escobar, 2019; ElKomy et al., 2020), aumento do rendimento e adaptação das culturas às condições locais (Zargar et al., 2019; Malyukova et al., 2021).Esses benefícios podem ser atribuídos a ação de cada nutriente no metabolismo vegetal, nos quais auxiliam as plantas nos processos fisiológicos e bioquímicos.

Em ambientes de estresse, o aporte adequado de nutrientes aumenta a tolerância das culturas através de mecanismos de defesa como, a produção de compostos osmorreguladores (prolina, glicina betaína, proteínas) (Figura 2), ativação de enzimas (peroxidase do ascorbato, dismutases de superóxido, catalase e fenilalanina amônia liase) (Figura 3), regulação na abertura estomática, maior desenvolvimento radicular permitindo uma absorção mais eficiente de água (Hussain et al., 2018; Dinneny, 2019; Bisht et al., 2023; Gong et al., 2023) entre outros.

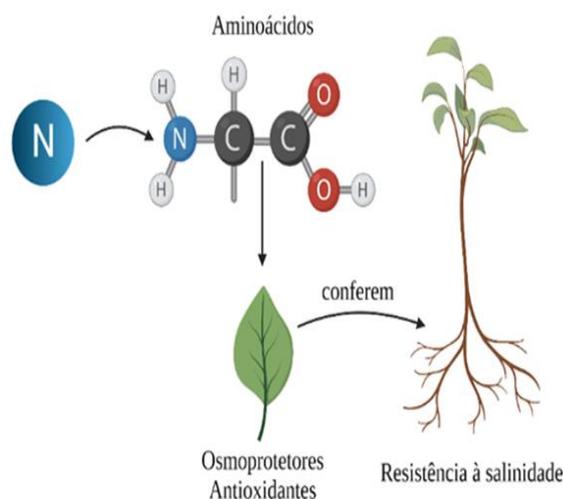


Figura 2. Mecanismo de adaptação à salinidade via suplementação nitrogenada. (Fonte: Autores, 2024)

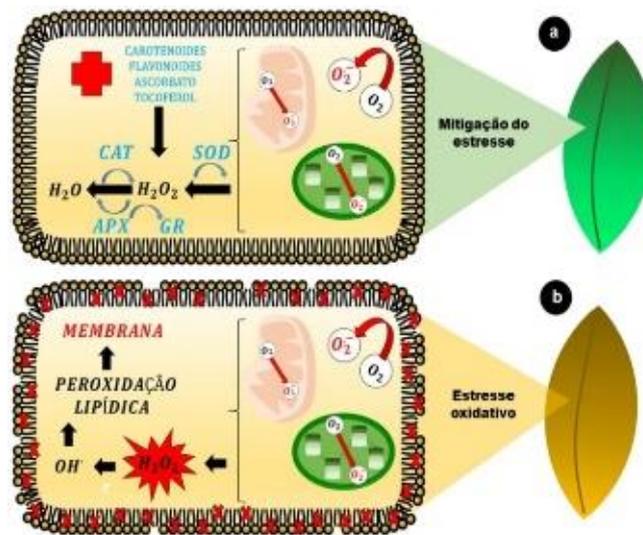


Figura 3. Representação do processo metabólico de vegetais com habilidade para reduzir os efeitos negativos do estresse oxidativo através de antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos (a), e vegetais com níveis elevados de dano oxidativo nos lipídios como resposta à formação de espécies reativas de oxigênio (ERO) (b). (Fonte: Lanza and Reis, 2021)

Os nutrientes potássio, cálcio e magnésio, desempenham um papel fundamental na regulação da abertura e fechamento dos estômatos, influenciando a capacidade das plantas de enfrentar condições adversas (Hasanuzzaman et al., 2018a), enquanto o nitrogênio, fósforo e os micronutrientes (molibdênio, cobre, zinco, boro, manganês...), atuam nos processos vitais como fotossíntese, respiração e síntese de proteínas, fundamentais para o crescimento e desenvolvimento das plantas (Malhotra et al., 2018; Tripathie et al., 2022).

Vale ressaltar ainda que plantas bem nutridas se tornam menos suscetíveis a pragas e doenças. A presença adequada de nutrientes fortalece a resistência, promovendo um sistema imunológico mais eficaz contra ataques de insetos e patógenos, sendo particularmente crucial em ambientes semiáridos, onde as plantas são frequentemente expostas a diferentes tipos de estresse (Vannier et al., 2019; Bentham et al., 2020; Gupta et al., 2022). Além disso, o potencial produtivo das culturas também pode ser alcançado por meio da nutrição mineral adequada.

A aplicação equilibrada de fertilizantes juntamente com a manutenção de níveis ótimos de nutrientes assegura que as plantas atinjam seu potencial de produção, contribuindo para os cultivos agrícolas em regiões semiáridas (Zhang et al., 2018a). Para que esse potencial seja mais facilmente alcançado, é sugerido ainda a utilização de variedades mais adaptadas às condições específicas do solo e do clima do semiárido, juntamente com práticas de nutrição mineral adequadas.

Nesse contexto, a busca por estratégias de nutrição adaptadas a condições específicas do semiárido é fundamental para enfrentar os desafios impostos por esse ambiente hostil. É visto que o conhecimento sobre o manejo adequado da nutrição para as culturas dessa região é de suma importância para amenizar os danos ocasionados aos cultivos agrícolas pelas condições climáticas desse local.

Compreender as interações complexas entre os nutrientes, a influência das condições climáticas adversas e as estratégias inovadoras que podem ser empregadas para otimizar a absorção e utilização eficiente de nutrientes pelas plantas, é crucial para desenvolver abordagens sustentáveis que não apenas maximizem o rendimento das culturas, mas também promovam uma maior tolerância as plantas em face das adversidades climáticas características do semiárido.

3.2 EFEITOS DA ADUBAÇÃO NITROGENADA E MOLIBDICA NO DESENVOLVIMENTO VEGETAL

O nitrogênio (N) destaca-se como um dos macronutrientes mais exigidos pelas culturas agrícolas, exercendo influência direta na distribuição de fotossimilados nas partes vegetativas e reprodutivas das plantas (Zhao et al., 2018). Essa influência resulta em modificações fisiológicas e morfológicas, estando intrinsecamente relacionada à fotossíntese, crescimento do sistema radicular, absorção iônica de nutrientes e desenvolvimento celular. Além disso, o N ainda desempenha papel fundamental na composição de moléculas vitais, como ATP, NADH, NADPH, DNA, RNA, clorofila e proteínas (Oresca et al., 2021).

Na natureza, organismos procariontes possuem a capacidade de assimilar o N atmosférico, transformando-o em amônia (NH₃) através de um processo denominado Fixação Biológica do Nitrogênio (FBN), sendo este conduzido pelo complexo enzimático da nitrogenase (Threatt e Rees, 2022) (Figura 4). A matéria orgânica (M.O) presente no solo também serve como fonte de nitrogênio, passando por processos de mineralização mediados por microrganismos, e resultando em amônio (NH₄⁺) e/ou nitrato (NO₃⁻), sendo essas as principais formas de N absorvidas pelas plantas (Jilling et al., 2018).

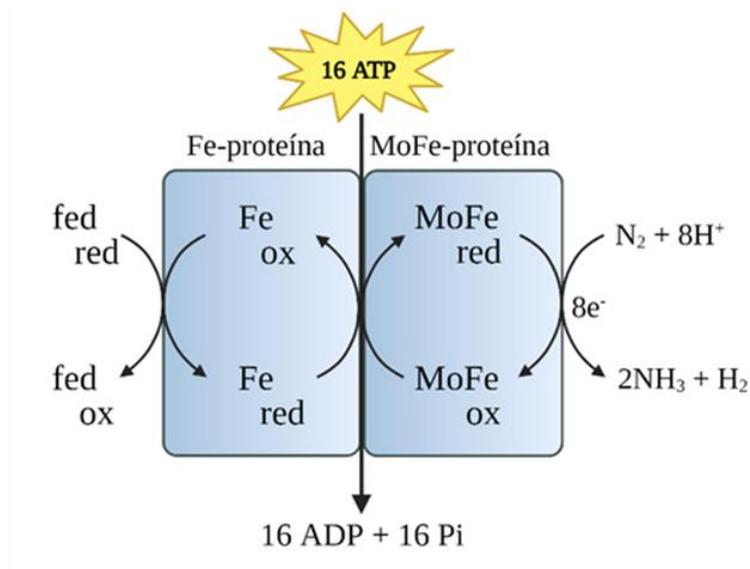


Figura 4. Reação de Fixação Biológica do Nitrogênio (FBN) atmosférico (Fonte: Adaptado de RAVEN et al., 1996)

A disponibilidade de N no solo, seja na forma de NH_4^+ ou NO_3^- , depende de fatores genéticos e ambientais. Solos mais ácidos favorecem a presença de amônia, retida devido à sua carga positiva, enquanto as formas nítricas são facilmente lixiviadas (Latifah et al., 2017; Dubey et al., 2021). Apesar de um maior gasto energético na absorção e redução, muitas plantas optam pela forma nítrica, uma vez que o excesso de amônia pode causar toxicidade, variando a tolerância entre as plantas (Shilpha et al., 2023).

Sendo assim, o manejo adequado de nitrogênio é crucial para o desenvolvimento pleno das culturas, pois seu excesso ou deficiência podem resultar em danos severos, como alargamento de entrenós, aborto de flores, atraso na maturação, maior suscetibilidade a doenças, alterações no pH intracelular, desequilíbrio osmótico, clorose e necrose foliar, além de coloração marrom do sistema radicular e caule (Bang et al., 2021; Dubey et al., 2021).

Destacado a importância do N para as culturas agrícolas, o papel do micronutriente molibdênio (Mo) não deve ser ignorada. Assim como o N, o Mo é de suma importância para o crescimento e desenvolvimento das culturas, participando de enzimas como a nitrogenase em bactérias fixadoras (FBN), na redutase de nitrato em plantas e na síntese de proteínas (Saha et al., 2017; Zhou et al., 2023). A disponibilidade desse nutriente é maior em solos com pH acima de 7,0, sendo mais comum a deficiência em solos ácidos, principalmente os arenosos (Ahmed et al., 2020). O excesso de molibdênio, apesar de sua importância, pode causar toxicidade e impactar negativamente no desenvolvimento das plantas (Han et al., 2020).

As plantas absorvem o molibdênio na forma de molibdato (MoO_4^{2-}), permanecendo na solução do solo como ânion, sendo transportado via fluxo de massa para as raízes e, posteriormente, pelo xilema (Hawkesford et al., 2023). Embora essencial, concentrações abaixo de $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$ podem comprometer o metabolismo do nitrogênio, enquanto concentrações acima de 3 mg kg^{-1} podem causar toxicidade tanto nas plantas quanto nos animais consumidores (Steiner et al., 2018).

A dosagem adequada de molibdênio varia conforme a cultura, podendo ser fornecido por meio de aplicação em sementes, via foliar na fase vegetativa ou via solo, embora esta última seja considerada de baixa eficiência, principalmente em solos do semiárido que possui baixa disponibilidade hídrica implicando em sua absorção pelas plantas. Embora haja pesquisas consideráveis sobre o molibdênio em culturas como feijão e soja, são necessárias mais investigações sobre o papel desse micronutriente em gramíneas, para compreender melhor sua dinâmica nessas culturas.

3.3 ESTRATÉGIAS DE MANEJO PARA OTIMIZAR A UTILIZAÇÃO DO NITROGÊNIO E MOLIBDÊNIO

Após uma ampla discussão abordando e destacando a importância da implementação sinérgica do nitrogênio e molibdênio para os cultivos agrícolas de regiões semiáridas, faz-se necessário agora conhecer e compreender as estratégias de manejo que otimizem essa interação. Já se sabe que o manejo adequado dos nutrientes no solo é fundamental para promover o crescimento vigoroso das plantas e, por conseguinte, otimizar os rendimentos agrícolas (Havlin et al., 2020). Nesse sentido, a inter-relação entre os elementos críticos, nitrogênio (N) e molibdênio (Mo), emerge como um componente crucial para o funcionamento saudável do metabolismo vegetal.

Diante da importância dessa interação, o desenvolvimento de estratégias de manejo torna-se imprescindíveis para garantir a disponibilidade adequada desses nutrientes no solo, promovendo assim um ambiente propício ao crescimento vegetal. Neste contexto, diversas estratégias de manejo que visam otimizar a inter-relação entre nitrogênio e molibdênio, abordam aspectos como fertilização, inoculação com microrganismos benéficos, monitoramento do solo, e outras práticas agronômicas fundamentais. A compreensão aprofundada dessas estratégias não apenas contribui para um maior rendimento das culturas agrícolas, mas também promove a sustentabilidade e redução de custos ao minimizar o uso excessivo de insumos.

3.3.1 Fornecimento Adequado de Nitrogênio (N)

Entre as estratégias que podem ser utilizadas pelos produtores para maximizar o rendimento das culturas nos ambientes semiáridos, encontra-se a fertilização com o nitrogênio (N). Embora o N

possa ser fixado biologicamente por algumas espécies, principalmente as leguminosas, já existem estudos que comprovam que essa fixação não supre totalmente a necessidade de N pelas culturas (exemplos, Meena et al., 2018; Cordeiro e Echer, 2019; Menza et al., 2020; Schogolev e Raievska, 2021; Lima et al., 2022). A importância do fornecimento adequado de N no solo não só beneficia as culturas, mas também todo o ecossistema, uma vez que sua aplicação exacerbada pode comprometer corpos de água superficiais/subterrâneos e a atividade microbiana do solo (Gai et al., 2016; Kiba e Krapp, 2016; Adl e Xu, 2020; Dong et al., 2021).

Existem inúmeros tipos e fontes de fertilizantes nitrogenados (Figura 5), que podem ser manejados de forma distintas, como por fertirrigação, via solo e/ou foliar, embora esta última seja menos comum (Tabela 1).



Figura 3. Classificação e fontes dos fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada. NBTP = n-(n- butil) tiofosfórico triamida; DMPP=3,4 dimetilpirazol fosfato. (Fonte: Adaptado de Guelfi, 2017)

Tabela 1 Diferentes métodos de manejo com fertilização nitrogenada em culturas comumente cultivadas em regiões semiáridas do Brasil e do mundo (Fonte: Autores, 2024)

Métodos de fertilização com N	Culturas	Autores (Ano)
Fertirrigação	Tomate	Liu et al., 20220
	Manga	Silber et al., 2021
	Alface	Mirdad et al., 2016
Solo	Milho	Deng et al., 2023
	Milheto	Wang et al., 2023
	Sorgo	Santos et al., 2023
Foliar	Feijão-caupi	Cavrei et al., 2021
	Escarola	Otálora et al., 2019
	Coentro	Yeganehpoor et al., 2019

Visto que o N é um elemento essencial para o crescimento e desenvolvimento das culturas, desempenhando papéis fundamentais em processos como a síntese de proteínas, formação de clorofila e desenvolvimento de estruturas celulares, sua indisponibilidade pode ser um fator limitante na produtividade agrícola, influenciando na qualidade nutricional e produtividade dos cultivos (O'Brien et al., 2016; Muratore e Prinsi, 2021). Sendo assim, para que seu fornecimento seja adequado, é necessário a compreensão profunda das interações no solo, evitando tanto a deficiência quanto o excesso desse nutriente (Padilla et al., 2020).

Nesse contexto, ao compreender as nuances da fertilização com nitrogênio, agricultores, pesquisadores e profissionais da área poderão adotar estratégias mais eficazes para suprir a necessidades dos cultivos agrícolas nas regiões semiáridas, atendendo às demandas crescentes por alimentos nesses ambientes.

3.3.2 Fertilização com Molibdênio (Mo)

Embora requerido em quantidades mínimas pelas plantas, o molibdênio (Mo) é indispensável para o funcionamento de enzimas-chave, especialmente aquelas envolvidas na Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) (Mendel, 2022). A fertilização com Mo surge como uma estratégia crucial no cenário agrícola de regiões semiáridas, desempenhando um papel fundamental na promoção do crescimento saudável das plantas e na otimização de processos bioquímicos essenciais (Pegoraro et al., 2018; Moussa et al., 2021).

A utilização desse micronutriente tem se mostrado muito eficaz nos sistemas de cultivos. Zhou et al. (2023) demonstraram que a fertilização com Mo, proporcionou o aumento da atividade dos rizóbios simbiótico culminando no crescimento e rendimentos mais elevados de misturas de gramíneas e leguminosas em solos com baixo teor de Mo. Além disso, o Mo pode auxiliar também no aumento da germinação, vigor e uniformidades das sementes (Abreu et al., 2023), na altura das plantas, produção de sementes e ramificações das folhas (Tejaswini, et al., 2023). No entanto, por se tratar de um micronutriente, a fertilização com Mo pode facilmente causar toxicidade as plantas, sendo de suma importância o manejo adequado desse nutriente.

Conhecer as necessidades da cultura quanto a fertilização com Mo é vital para que o agricultor ou o profissional da área possa adotar práticas mais eficazes, a fim de evitar danos ao vegetal. Na figura 6, é visto que as dosagens de Mo pode variar em função da cultura, condições do solo, manejos de aplicação entre outros.

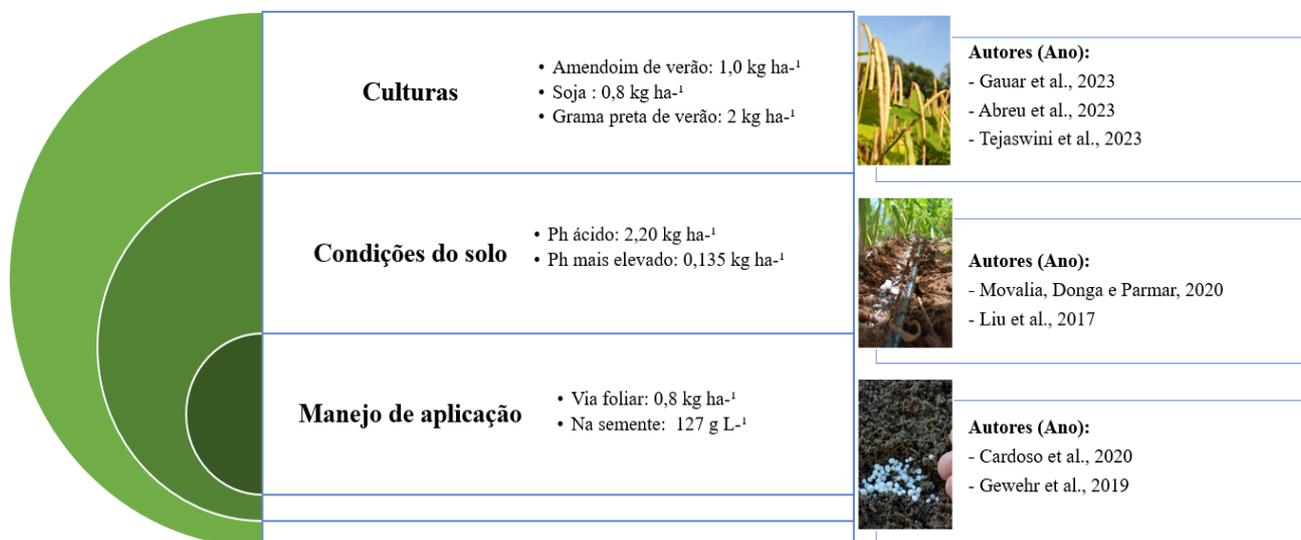


Figura 4. Exemplos de variabilidade nas dosagens de molibdênio em diferentes condições de cultivos (Fonte: Autores, 2024)

3.3.3 Monitoramento dos nutrientes: Teor de molibdênio e nitrogênio no solo e planta

O monitoramento dos nutrientes no solo e na planta é uma prática agrícola de suma importância que busca otimizar a gestão de nutrientes no solo, auxiliando os agricultores nas tomadas de decisões quanto a quantidade, fonte e período de aplicação desses nutrientes, a fim de atender às demandas específicas das diferentes culturas (Patil, 2016; Malik et al., 2021). Sendo assim, o monitoramento rigoroso do teor de molibdênio (Mo) e nitrogênio (N), pode ser uma estratégia prática utilizada para promover um ambiente propício para o crescimento das culturas em ambientes

semiáridos, visto que a ausência ou os teores inadequados de Mo podem comprometer o metabolismo do N influenciando diretamente na produtividade agrícola (Imran et al., 2019; Lumactud et al., 2023).

Existem vários métodos para monitorar os teores de nutrientes no solo e planta, alguns desses são (Figura 7) (Recena et al., 2018; Kabzhanova et al., 2020; Larionov et al., 2021; Salvi et al., 2021):



Figura 5. Métodos utilizados para o monitoramento da fertilidade do solo e nutrição da planta. Sintomas visuais de deficiência (A), Amostragem de solo (B), Análise de tecido (C), Monitoramento com sensoriamento remoto de lavouras (D) e Sensores In Situ (E) (Fonte: Autores, 2024).

Sintomas visuais de deficiência: Se baseia na identificação visual de deficiência dos nutrientes nas plantas.

Amostragem de solo: Se destaca como um dos principais e mais utilizados métodos, sendo baseado na avaliação da fertilidade através da amostragem, extração e determinação dos nutrientes no solo, auxiliando assim na recomendação de adubação para as culturas.

Análise de tecido: Sua análise se baseia na determinação química dos nutrientes nos tecidos do vegetal.

Monitoramento com sensoriamento remoto de lavouras: Esse método se baseia na utilização de tecnologias como imagens de satélite para mapear a vegetação e identificar padrões relacionados à fertilidade do solo, além da utilização de sensores de campo que medem a refletância das plantas atribuindo a sua condição nutricional.

Sensores In Situ: Se utilizam de sensores em campo para monitorar as condições do solo em tempo real, incluindo a fertilidade do solo.

Por ser muito dinâmico no solo e exigido em quantidades muito significativas pelas culturas (Yokobe et al., 2018; Xiao et al., 2018; Fu et al., 2020), recomenda-se que a adubação com N seja realizada mesmo na ausência de uma análise de solo ou foliar, pois, a deficiência desse macronutriente pode ocasionar vários danos diretos na planta, como amarelamento das folhas mais velhas, crescimento retardado, menor produção de clorofila entre outros (Jokinen et al., 2019; Osório et al., 2020;). No entanto, a caráter de redução de custo de produção e manejo adequado nesse nutriente, recomenda-se fortemente o seu monitoramento no solo e na planta.

No caso do Mo, sua deficiência é mais incomum nos vegetais, no entanto, fatores como solos ácidos, baixo teor de matéria orgânica e competição por íons, podem comprometer sua disponibilidade, afetando a produtividade das culturas. Além disso, estudos mostram que o aporte adequado de Mo no solo e na planta promovem maior absorção e acúmulo de outros nutrientes como nitrogênio, fósforo, potássio, cobre, ferro, manganês e zinco (Santos et al., 2019; Rana et al., 2020; Moussa et al., 2021).

Com isso, a adoção de práticas de monitoramento nos cultivos agrícolas é crucial para que os agricultores possam não apenas reduzir os custos de produção, mas também prevenir deficiências ou excessos de nutrientes, aumentando assim a eficiência no uso de fertilizantes, além de diminuir os impactos ambientais.

3.3.4 Ajuste do pH do solo

O ajuste do pH do solo é uma estratégia prática que auxilia na disponibilidade e eficiência de utilização dos nutrientes, como o nitrogênio e molibdênio, pelas plantas (Saravanan e Kamarasan, 2018; (Neina, 2019). Essa variável, que mede a acidez ou alcalinidade do solo, é um fator determinante na solubilidade e disponibilidade dos nutrientes podendo afetar a produtividade agrícola das culturas. (Ghimire et al., 2017; Hajiboland, 2019; Theresa et al., 2019). A disponibilidade de grande parte dos nutrientes ocorre entre o pH de 6,5 e 7,0 (Figura 8), sendo considerado a faixa ideal.

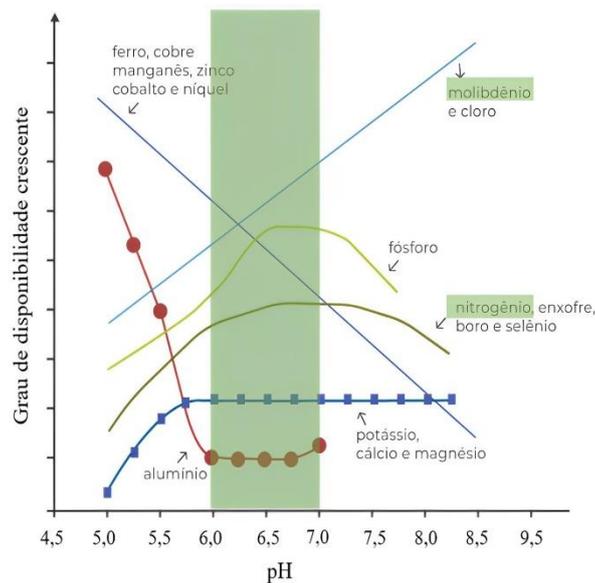


Figura 6. Relação entre disponibilidade de nutrientes e pH do solo. (Fonte: Malavolta, 1979).

Práticas como a correção da acidez do solo com calcário, é bastante recomendada na agricultura e mostram resultados satisfatórios. Segundo Ameyu et al., (2020), a aplicação de calcário e fósforo melhoraram os grãos e o rendimento da soja cultivada em solos ácidos. Wang et al., (2021), também observaram que solos que passam pela prática da calagem podem proporcionar rendimentos das culturas de até 36,3%, além de aumentar o estoque de carbono orgânico do solo.

3.3.5 Inoculação com Microrganismos

Práticas de inoculação com microrganismos tem ganhado cada vez mais espaço, se apresentando como uma estratégia inovadora e crucial na agricultura (Soumare et al., 2020; Zveushe et al., 2023). Proporcionando redução na utilização de fertilizantes químicos e na promoção de áreas agrícolas mais sustentáveis, essa prática se baseia na simbiose entre plantas e microrganismos benéficos (Bona et al., 2018; Chialva, et al., 2021), e com isso vem se destacando não apenas pelos benefícios diretos nas plantas, mas também pelos impactos positivos ao solo. (Schröder et al., 2019).

A inoculação com microrganismos não se limita apenas aos mecanismos biológicos envolvidos na fixação de nitrogênio, mas também nas estratégias de maior disponibilidade de fósforo, carbono lábil, fitohormônios e competição com os patógenos do solo em diferentes sistemas agrícolas. Em estudos realizados por Benjamin et al., (2022), observou-se que a simbiose benéfica com os microrganismos como endófitos, fungos micorrízicos arbusculares e os rizóbios fixadores de nitrogênio proporcionou aumento na tolerância das plantas hospedeiras em ambientes de estresse.

Além disso, Cruz et al. (2023), relataram que as bactérias promotoras do crescimento das plantas de Cabo Verde proporcionaram o aumento na produção de prolina e reduziu os danos às proteínas, atribuindo assim maior tolerância a cultura do milho submetido a ambiente com estresse

salino. Entre os benefícios proporcionado pela ação desses microrganismos nos sistemas agrícolas, tem-se também a regulação da fertilidade do solo, a ciclagem de nutrientes e a manutenção da diversidade das plantas (Ramakrishna et al., 2019).

Portanto, ao compreender a dinâmica desta simbiose, os agricultores poderão potencializar os processos naturais da nutrição vegetal, diminuindo a necessidade de fertilizantes nitrogenados sintéticos e, conseqüentemente, reduzindo os custos de produção e mitigação dos impactos ambientais associados ao uso excessivo desses fertilizantes, promovendo assim sistemas agrícolas mais eficientes, resilientes e ecologicamente equilibrados.

3.3.6 Rotação de Culturas

A rotação de culturas se configura como uma prática agrônômica arcaica de substancial importância para as áreas agrícolas, sendo relevante até os dias de hoje (Chamberlain et al., 2020). Esta estratégia se baseia na diversificação de culturas em áreas de cultivos ao longo do tempo, contribuindo para a fertilidade e estrutura dos solos, e conseguinte, no rendimento das culturas (Figura 9). (Wang et al., 2019).

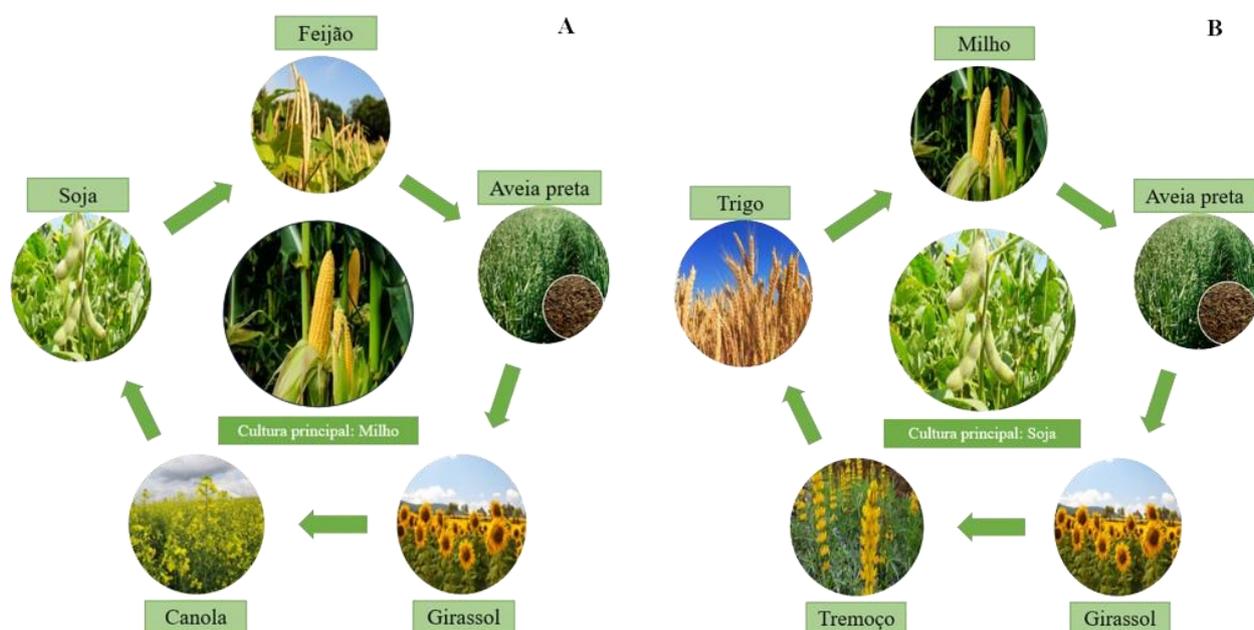


Figura 7. Esquema com sistema de rotação de cultivos eficientes. Cultivo principal com milho = Cultura antecessora: Feijão, soja e aveia preta; Cultura sucessora: Canola e girassol (A); Cultivo principal com soja = Cultura antecessora: Milho, trigo e aveia preta; Cultura sucessora: Tremoço e girassol (B) (Fonte: Autores, 2024)

A alternância de espécies de plantas em uma mesma área, oferece estratégias eficaz quanto ao controle de pragas e patógenos, na redução do surgimento de ervas daninhas, na necessidade de

utilização de agroquímicos e no ciclo de nutrientes, visto que as culturas exploram diferentes camadas do solo contribuindo para uma fertilidade mais equilibrada (Hasanuzzaman, 2019; Bargués-Ribera et al., 2020; Rusinamhodzi, et al., 2020; Zhang et al., 2020). Essa estratégia pode aumentar os rendimentos das culturas em até 20% (Bowles et al., 2020; Zhao et al., 2020), contribuindo significativamente na renda dos agricultores.

No contexto de otimizar a utilização de nutrientes como nitrogênio (N) e molibdênio (Mo), a rotação de culturas pode ser uma das estratégias a se destacar. Como mencionado anteriormente, o nitrogênio é um macronutriente que pode ser disponível para as plantas através da adição de fertilizantes nitrogenados ou pela fixação biológica de nitrogênio (FBN). A FBN é realizada por bactérias existentes no solo que fazem simbiose com a planta, principalmente com leguminosas como feijão, soja, ervilha, amendoim, trevo branco entre outras (Mahmud et al., 2020; Ma et al., 2022). Sendo assim, a inclusão dessas culturas em sistema de rotação de culturas, pode favorecer um maior aporte de nitrogênio no solo, reduzindo a utilização de fertilizantes nitrogenados para os próximos cultivos. Além disso, essa prática ainda proporciona aumento nos teores de matéria orgânica, resultando em uma maior disponibilidade de micronutrientes, como o molibdênio, no solo (Dhaliwal et al., 2019). Vale ressaltar que a disponibilidade de Mo é necessário para que as plantas possam realizar os processos de FBN e da redução do nitrato a nitrito, impactando diretamente no metabolismo do N.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo de revisão teve como objetivo abordar a importância da interação sinérgica entre nitrogênio e molibdênio nos cultivos agrícolas das regiões semiáridas. Com isso, concluiu-se que o manejo adequado com nitrogênio e molibdênio é crucial para elevar os rendimentos das culturas do semiárido, no entanto, para que o nitrogênio possa ser utilizado de forma eficaz é necessário o fornecimento adequado de molibdênio no solo ou planta. Esse micronutriente é exigido em quantidades mínimas, no entanto, sua ausência pode comprometer o metabolismo do N nas plantas.

A adoção de práticas como monitoramento dos teores de N e Mo, inoculação com microrganismos, ajuste do pH do solo e rotação de culturas, elevam os teores desses nutrientes no solo reduzindo a necessidade de fertilizantes sintéticos, além de promover um ambiente mais sustentável e plantas mais tolerantes a situações de estresses como déficit hídrico, salinidade e temperaturas extremas. Vale ressaltar ainda, que embora essas práticas proporcionam aumento nos teores de Mo e N, a exclusão total de fertilizantes químicos não é recomendada.

Embora já exista relatos na literatura sobre esse tema, constatou-se a necessidade de mais investimentos em pesquisa e práticas agrícolas que ressaltem estratégias para um melhor aproveitamento dos benefícios dessa interação em ambientais semiáridos.

5. REFERÊNCIAS

Abdelkhalik, A., El-Mageed, T., Mohamed, I., Semida, W., Al-Elwany, O., Ibrahim, I., Hemida, K., El-Saadony, M., AbuQamar, S., El-Tarabily, K., & Gyushi, M. 2023. Soil application of effective microorganisms and nitrogen alleviates salt stress in hot pepper (*Capsicum annum* L.) plants. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1079260>.

Abreu, C. J., Gruberger, G., Cardoso, P., Gonçalves, P., Nogueira, T., Capra, G., & Jani, A. 2023. Soybean Seed Enrichment with Cobalt and Molybdenum as an Alternative to Conventional Seed Treatment. *Plants*, 12 5. <https://doi.org/10.3390/plants12051164>.

Adl, S., Liu, M., & Xu, X. 2020. Mapping soil nitrogen fractionation. *Rhizosphere*, 16, 100279. <https://doi.org/10.1016/J.RHISPH.2020.100279>.

Ahmed, Mukhtar et al. Plant nutrients for crop growth, development and stress tolerance. 2020. *Sustainable agriculture in the era of climate change*, p. 43-92.

Alam, I., Zhang, H., Du, H., Rehman, N., Manghwar, H., Lei, X., Khan, Z., Batool, K., & Ge, L. 2023. Bioengineering Techniques to Improve Nitrogen Transformation and Utilization: Implications for Nitrogen Use Efficiency and Future Sustainable Crop Production. *Journal of agricultural and food chemistry*. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c08051>.

Alsharif, W., Saad, M., & Hirt, H. 2020. Desert Microbes for Boosting Sustainable Agriculture in Extreme Environments. *Frontiers in Microbiology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01666>.

Ameyu, T., & Asfaw, E. 2020. Effect of Lime and Phosphorus Fertilizer on Soybean [*Glycine max* L. (Merrill)] Grain Yield and Yield Components at Mettu in South Western Ethiopia. *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, 8, 144. <https://doi.org/10.11648/J.IJEMA.20200805.13>.

Arunachalam, A., & Andreasson, H. 2021. RaspberryPi-Arduino (RPA) powered smart mirrored and reconfigurable IoT facility for plant science research. *Internet Technology Letters*, 5. <https://doi.org/10.1002/itl2.272>.

Banerjee, P., Das, P., & Sinha, S. 2021. Importance of molybdenum for the production of pulse crops in India. *Journal of Plant Nutrition*, 45, 300 - 310. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1952226>.

- Bang, T. C., Husted, S., Laursen, K. H., Persson, D. P., & Schjoerring, J. K. 2021. The molecular-physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants. *New Phytologist*, 2446-2469., v. 229, n. 5, p. 2446-2469, 2021. <https://doi.org/10.1111/nph.17074>
- Bargués-Ribera, M., & Gokhale, C. 2020. Eco-evolutionary agriculture: Host-pathogen dynamics in crop rotations. *PLoS Computational Biology*, 16. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1007546>.
- Bazzo, J. H. B., da Costa, D. S., Barbizan, T., Barbosa, A. P., de Oliveira, E. C., & Zucareli, C. 2018. Molybdenum application associated with nitrogen fertilization on yield and physiological potential of wheat seeds. *Semina: Ciências Agrárias*, 39(1), 67-75. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2018v39n1p67>
- Benjamin, G., Pandharikar, G., & Frendo, P. 2022. Salicylic Acid in Plant Symbioses: Beyond Plant Pathogen Interactions. *Biology*, 11. <https://doi.org/10.3390/biology11060861>.
- Bentham, A., Concepcion, J., Mukhi, N., Zdrzałek, R., Draeger, M., Gorenkin, D., Hughes, R., & Banfield, M. 2020. A molecular roadmap to the plant immune system. *The Journal of Biological Chemistry*, 295, 14916 - 14935. <https://doi.org/10.1074/jbc.REV120.010852>.
- Bernal, N. A. H. 2007. Avaliação de técnicas de captação de água de chuva para recuperação ambiental na região semiárida do vale do Jequitinhonha. Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Bhunja, S., Bhowmik, A., Mallick, R., & Mukherjee, J. 2021. Agronomic Efficiency of Animal-Derived Organic Fertilizers and Their Effects on Biology and Fertility of Soil: A Review. *Agronomy*, 11, 823. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11050823>.
- Biełło, K., Lucena, C., López-Tenllado, F., Hidalgo-Carrillo, J., Rodríguez-Caballero, G., Cabello, P., Sáez, L., Luque-Almagro, V., Roldán, M., Moreno-Vivián, C., & Olaya-Abril, A. 2023. Holistic view of biological nitrogen fixation and phosphorus mobilization in *Azotobacter chroococcum* NCIMB 8003. *Frontiers in Microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1129721>.
- Bisht, N.; Joshi, H.; Chauhan, P. S. 2023. Nutrients Regulation and Abiotic Stress Tolerance in Plants. *Plant Ionomics: Sensing, Signaling, and Regulation*, p. 209-223,
- Bohlool, B. B., Ladha, J. K., Garrity, D. P., & George, T. 1992. Biological nitrogen fixation for sustainable agriculture: A perspective. *Plant and soil*, 141, 1-11.
- Bona, E., Todeschini, V., Cantamessa, S., Cesaro, P., Copetta, A., Lingua, G., Gamalero, E., Berta, G., & Massa, N. 2018. Combined bacterial and mycorrhizal inocula improve tomato quality at

reduced fertilization. *Scientia Horticulturae*, 234, 160-165.
<https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2018.02.026>.

Bowles, T., Mooshammer, M., Socolar, Y., Calderón, F., Cavigelli, M., Culman, S., Deen, W., Drury, C., Garcia, A., Gaudin, A., Harkcom, W., Lehman, R., Osborne, S., Robertson, G., Salerno, J., Schmer, M., Strock, J., & Grandy, A. 2020. Long-Term Evidence Shows that Crop-Rotation Diversification Increases Agricultural Resilience to Adverse Growing Conditions in North America. *One Earth*. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.02.007>.

Cardoso, B., Lazarini, E., Moreira, A., Moraes, L., Santos, F., & Dameto, L. 2020. Effect of Foliar Molybdenum Application on Seed Quality of Soybean Cultivars. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52, 666 - 672. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1862164>.

Chamberlain, L., Bolton, M., Cox, M., Suen, G., Conley, S., & Ané, J. 2020. Crop rotation, but not cover crops, influenced soil bacterial community composition in a corn-soybean system in southern Wisconsin. *Applied Soil Ecology*, 154, 103603. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103603>.

Chialva, M., Lanfranco, L., & Bonfante, P. 2021. The plant microbiota: composition, functions, and engineering. *Current opinion in biotechnology*, 73, 135-142.
<https://doi.org/10.1016/j.copbio.2021.07.003>.

Choi, S., Lee, Z., Jeong, E., Kim, S., Seo, J., Um, T., & Shim, J. 2023. Signaling pathways underlying nitrogen transport and metabolism in plants. *BMB Reports*, 56, 56 - 64.
<https://doi.org/10.5483/BMBRep.2022-0178>.

Cordeiro, C., & Echer, F. 2019. Interactive Effects of Nitrogen-Fixing Bacteria Inoculation and Nitrogen Fertilization on Soybean Yield in Unfavorable Edaphoclimatic Environments. *Scientific Reports*, 9. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52131-7>.

Deng, M., Ma, H., Sadeghpour, A., Yang, G., Hu, Y., & Yang, D. 2023. Responses of crop production and soil health to chemical nitrogen fertilization in a maize-wheat rotation system. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1108288. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1108288>.

Dhaliwal, S. S., Naresh, R. K., Mandal, A., Singh, R., & Dhaliwal, M. K. 2019. Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: A review. *Environmental and Sustainability Indicators*, 1, 100007.
<https://doi.org/10.1016/j.indic.2019.100007>

- Dinneny, J. R. 2019. Developmental responses to water and salinity in root systems. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, 35, 239-257. <https://doi.org/10.1146/annurev-cellbio-100617-062949>.
- Dong, H., Fan, S., Sun, H., Chen, C., Wang, A., Jiang, L., & Ma, D. 2021. Rhizosphere-Associated Microbiomes of Rice (*Oryza sativa* L.) Under the Effect of Increased Nitrogen Fertilization. *Frontiers in Microbiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.730506>.
- Dubey, R. S.; Srivastava, R. K.; Pessaraki, M. 2021. Physiological mechanisms of nitrogen absorption and assimilation in plants under stressful conditions. In: *Handbook of plant and crop physiology*. CRC Press, p. 579-616.
- ElKomy, M., Ibrahim, Y., Saleh, A., & Molan, Y. 2020. Integration of rhizobacterial mixture and silicon nutrition shows potential for the management of charcoal rot of sunflowers caused by *Macrophomina phaseolina* in semi-arid regions. *Journal of Plant Pathology*, 102, 1227 - 1239. <https://doi.org/10.1007/s42161-020-00652-w>.
- Falco, N., Wainwright, H., Dafflon, B., Ulrich, C., Soom, F., Peterson, J., Brown, J., Schaettle, K., Williamson, M., Cothren, J., Ham, R., McEntire, J., & Hubbard, S. 2021. Influence of soil heterogeneity on soybean plant development and crop yield evaluated using time-series of UAV and ground-based geophysical imagery. *Scientific Reports*, 11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86480-z>.
- Feng, X., Wang, M., Li, Q., Qin, Y., Sun, B., Tan, P., Zhang, J. 2024. Comammox dominate soil nitrification under different N fertilization regimes in semi-arid areas of Northeast China. *Applied Soil Ecology*, 193, 105119. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105119>
- Fernández-Escobar, R. 2019. Olive Nutritional Status and Tolerance to Biotic and Abiotic Stresses. *Frontiers in Plant Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01151>.
- Fu, H., Duan, Y., Zhu, P., Gao, H., Xu, M., & Yang, X. 2020. Potential N mineralization and availability to maize in black soils in response to soil fertility improvement in Northeast China. *Journal of Soils and Sediments*, 21, 905 - 913. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02794-x>.
- Gai, X., Liu, H., Zhai, L., Tan, G., Liu, J., Ren, T., & Wang, H. 2016. Vegetable yields and soil biochemical properties as influenced by fertilization in southern China. *Applied Soil Ecology*, 107, 170-181. <https://doi.org/10.1016/J.APSOIL.2016.06.001>.
- Gaur, D., Jadav, N. J., Maheta, A., & Gaur, S. 2023. Effect of Iron, Molybdenum and Rhizobium on Growth, Yield Attributes and Yield of Summer Groundnut (*Arachis hypogaea* L.) in Loamy Sand

- Soil. *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(4), 130-137. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i42809>.
- Gewehr, E., Corrêa, O. de O., Suñé, A. dos S., Duarte, G. B., Amarante, L. do, Tunes, L. V. M. de, & Brandstetter Rodrigues, D. 2019. Treatment of soybean seeds with molybdenum and inoculant: nitrate reductase activity and agronomic performance. *Comunicata Scientiae*, 10(1), 186–194. <https://doi.org/10.14295/cs.v10i1.2780>
- Ghimire, R., Machado, S., & Bista, P. 2017. Soil pH, Soil Organic Matter, and Crop Yields in Winter Wheat–Summer Fallow Systems. *Agronomy Journal*, 109, 706-717. <https://doi.org/10.2134/AGRONJ2016.08.0462>.
- Giacometti, C., Mazzon, M., Cavani, L., Triberti, L., Baldoni, G., Ciavatta, C., & Marzadori, C. 2021. Rotation and Fertilization Effects on Soil Quality and Yields in a Long-Term Field Experiment. *Agronomy*. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11040636>.
- Gong, Z., Xiong, L., Shi, H., Yang, S., Herrera-Estrella, L., Xu, G., Chao, D., Li, J., Wang, P., Qin, F., Li, J., Ding, Y., Shi, Y., Wang, Y., Yang, Y., Guo, Y., & Zhu, J. 2020. Plant abiotic stress response and nutrient use efficiency. *Science China Life Sciences*, 63, 635-674. <https://doi.org/10.1007/s11427-020-1683-x>.
- Gopal, R., & Shukla, A. 2017. Molybdenum Stress Modulates Enzymes Responsive to Oxidative Stress and Affects Seeds Viability and Vigor in Chickpea. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48, 43 - 50. <https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1253718>.
- Guelfi, D. Fertilizantes nitrogenados estabilizados, de liberação lenta ou controlada. Piracicaba: IPNI, 2017.
- Gul, Z., Tang, Z., Arif, M., & Ye, Z. 2022. An Insight into Abiotic Stress and Influx Tolerance Mechanisms in Plants to Cope in Saline Environments. *Biology*, 11. <https://doi.org/10.3390/biology11040597>.
- Gupta, R., Leibman-Markus, M., Anand, G., David, D., Yermiyahu, U., Elad, Y., & Bar, M. 2022. Nutrient elements promote disease resistance in tomato by differentially activating immune pathways. *Phytopathology*. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-02-22-0052-R>.
- Hadebe, S., Modi, A., & Mabhaudhi, T. 2017. Drought Tolerance and Water Use of Cereal Crops: A Focus on Sorghum as a Food Security Crop in Sub-Saharan Africa. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 203, 177-191. <https://doi.org/10.1111/JAC.12191>.

- Hajiboland, R. 2018. Nutrient Deficiency and Abundance in Tea Plants: Metabolism to Productivity, 173-215. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2140-5_9.
- Han, Zhangxiong et al. Effect of molybdenum on plant physiology and cadmium uptake and translocation in rape (*Brassica napus* L.) under different levels of cadmium stress. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 7, p. 2355, 2020. <https://doi.org/10.3390/ijerph17072355>
- Hasanuzzaman, M. 2019. *Agronomic Crops: Volume 2: Management Practices*. Agronomic Crops. <https://doi.org/10.1007/978-981-32-9783-8>.
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M., Nahar, K., Hossain, M., Mahmud, J., Hossen, M., Masud, A., M., & Fujita, M. 2018a. Potassium: A Vital Regulator of Plant Responses and Tolerance to Abiotic Stresses. *Agronomy*, 8, 31. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY8030031>.
- Hasanuzzaman, M., Fujita, M., Oku, H., Nahar, K., & Hawrylak-Nowak, B. 2018a. Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8>.
- Havlin, J., & Heiniger, R. 2020. Soil Fertility Management for Better Crop Production. *Agronomy*, 10, 1349. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091349>.
- Hawkesford, M. J., Çakmak, İ., Coskun, D., De Kok, L. J., Lambers, H., Schjoerring, J. K., & White, P. J. 2023. Functions of macronutrients. In *Marschner's Mineral Nutrition of Plants*, pp. 201-281. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819773-8.00019-8>
- Hemida, K., Eloufey, A., Hassan, G., Rady, M., El-Sadek, A., & Abdelfattah, M. 2022. Integrative NPK soil and foliar application improves growth, yield, antioxidant, and nutritional status of *Capsicum annuum* L. in sandy soils under semi-arid condition. *Journal of Plant Nutrition*, 46, 1091 - 1107. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2046060>.
- Hendricks, S., Zechmeister-Boltenstern, S., Kandeler, E., Sanden, T., Diaz-Pines, E., Schneckner, J., & Spiegel, H. 2022. Agricultural management affects active carbon and nitrogen mineralisation potential in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 185(4), 513-528. <https://doi.org/10.1002/jpln.202100130>.
- Heshmat, K., Lajayer, B., Shakiba, M., & Astatkie, T. 2021. Assessment of physiological traits of common bean cultivars in response to water stress and molybdenum levels. *Journal of Plant Nutrition*, 44, 366 - 372. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1822395>.

- Hussain, S., Khalid, M., Hussain, M., Ali, M., Nawaz, A., Zakir, I., Fatima, Z., & Ahmad, S. 2018. Role of Micronutrients in Salt Stress Tolerance to Plants., 363-376. https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8_15.
- Imran, M., Hu, C., Hussain, S., Rana, M. S., Riaz, M., Afzal, J., ... & Sun, X. 2019. Molybdenum-induced effects on photosynthetic efficacy of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) under different nitrogen sources are associated with nitrogen assimilation. *Plant Physiology and Biochemistry*, 141, 154-163. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.05.024>
- Imran, M., Sun, X., Hussain, S., Ali, U., Rana, M. S., Rasul, F., & Hu, C. X. 2019. Molybdenum-induced effects on nitrogen metabolism enzymes and elemental profile of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) under different nitrogen sources. *International journal of molecular sciences*, 20(12), 3009.
- Imran, M., Sun, X., Hussain, S., Ali, U., Rana, M., Rasul, F., Shaukat, S., & Hu, C. 2020. Molybdenum Application Regulates Oxidative Stress Tolerance in Winter Wheat Under Different Nitrogen Sources. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00254-6>.
- Jilling, A., Keiluweit, M., Contosta, A., Frey, S., Schimel, J., Schneck, J., Smith, R., Tiemann, L., & Grandy, A. 2018. Minerals in the rhizosphere: overlooked mediators of soil nitrogen availability to plants and microbes. *Biogeochemistry*, 139, 103-122. <https://doi.org/10.1007/s10533-018-0459-5>.
- Jokinen, J., & Irving, L. 2019. Effects of Light Level and Nitrogen Supply on the Red Clover–Orobanche Minor Host–Parasite Interaction. *Plants*, 8. <https://doi.org/10.3390/plants8060146>.
- Kabzhanova, G., Baktybekov, K., Aimbetov, A., Aligazhiyeva, L., & Kabdulova, G. (2020). Use of Earth remote sensing data for the monitoring of the level of soil fertility., 11524, 115241X - 115241X-10. <https://doi.org/10.1117/12.2570967>.
- Kaveri, K., Singh, R., & Indu, T. 2022. Effect of Foliar Spray of Nitrogen and NAA on Growth and Yield Traits of Cowpea (*Vigna unguiculata* L.). *International Journal of Plant & Soil Science*. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2022/v34i1831053>.
- Kiba, T., & Krapp, A. 2016. Plant Nitrogen Acquisition Under Low Availability: Regulation of Uptake and Root Architecture. *Plant and Cell Physiology*, 57, 707 - 714. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcw052>.

- Kibblewhite, M. G., Ritz, K., & Swift, M. J. 2008. Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 685-701. <https://doi.org/10.21474/ijar01/13994>.
- Kumar, S., Kumar, S., & Mohapatra, T. 2021. Interaction Between Macro- and Micro-Nutrients in Plants. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.665583>.
- Kumari, S., Patra, D., Mishra, N., & Panigrahi, K. 2021. Impact of abiotic stress on the root growth and development. *Microbial Management of Plant Stresses*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-85193-0.00016-4>.
- Lanza, M.G.D.B., Silva, V.M., Montanha, G.S., Lavres, J., Pereira de Carvalho, H.W., Reis, A.R. dos, 2021. Assessment of selenium spatial distribution using μ -XFR in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) plants: Integration of physiological and biochemical responses. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 207, 111216. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111216>
- Larionov, Y., Zharnikov, V., Baranova, E., Larionova, O., & Kovalivker, G. 2021. Significance of soil fertility indicators for monitoring. *Interexpo GEO-Siberia*. V.4, n.2, p. 98-103. <https://doi.org/10.33764/2618-981x-2021-4-2-98-103>.
- Latifah, O.; A., O. H.; Abdul, N. M. Enhancing nitrogen availability, ammonium adsorption-desorption, and soil pH buffering capacity using composted paddy husk. *Eurasian soil science*, v. 50, p. 1483-1493, 2017. <https://doi.org/10.1134/S1064229317130038>
- Li, C., Yang, Z., Zhang, C., Luo, J., Zhang, F., & Qiu, R. 2023. Effects of Nitrogen Application in Recovery Period after Different High Temperature Stress on Plant Growth of Greenhouse Tomato at Flowering and Fruiting Stages. *Agronomy*, 13(6), 1439. [10.3390/agronomy13061439](https://doi.org/10.3390/agronomy13061439)
- Lima, A. M. S., de Oliveira, E. C. A., Martins, V. R. S., da Silva, L. B., de Souza, P. H. N., & Freire, F. J. 2022. Integrated Application of Nitrogen, Molybdenum and Plant Growth-Promoting Rhizobacterium can Enhance the Sugarcane Growth. *Sugar Tech*, 24(6), 1748-1765. *Sugar Tech* (Nov-Dec 2022) 24(6):1748–1765. <https://doi.org/10.1007/s12355-022-01133-3>
- Liu, L., Wei, X., Ji, M., Yang, C., Li, L., Gao, D., & Fu, X. 2017. Effects of molybdenum on nutrition, quality, and flavour compounds of strawberry (*Fragaria×ananassa* Duch. cv. Akihime) fruit. *Journal of Integrative Agriculture*, 16, 1502-1512. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61518-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61518-6).
- Liu, R., Yang, Y., Wang, Y. S., Wang, X. C., Rengel, Z., Zhang, W. J., & Shu, L. Z. 2020. Alternate partial root-zone drip irrigation with nitrogen fertigation promoted tomato growth, water and

- fertilizer-nitrogen use efficiency. *Agricultural Water Management*, 233, 106049. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106049>
- Losacco, D., Ancona, V., De Paola, D., Tumolo, M., Massarelli, C., Gatto, A., & Uricchio, V. F. 2021. Development of ecological strategies for the recovery of the main nitrogen agricultural pollutants: A review on environmental sustainability in agroecosystems. *Sustainability*, 13(13), 7163. <https://doi.org/10.3390/su13137163>.
- Lumactud, R. A., Dollete, D., Liyanage, D. K., Szczyglowski, K., Hill, B., & Thilakarathna, M. S. 2023. The effect of drought stress on nodulation, plant growth, and nitrogen fixation in soybean during early plant growth. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 209(3), 345-354. <https://doi.org/10.1111/jac.12627>
- Lyzenga, W. J., Liu, Z., Olukayode, T., Zhao, Y., Kochian, L. V., & Ham, B. K. (2023). Getting to the roots of N, P, and K uptake. *Journal of Experimental Botany*, 74(6), 1784-1805.. <https://doi.org/10.1093/jxb/erad035>.
- Ma, J., Olin, S., Anthoni, P., Rabin, S., Bayer, A., Nyawira, S., & Arneeth, A. 2022. Modeling symbiotic biological nitrogen fixation in grain legumes globally with LPJ-GUESS, Geoscientific Model Development. v4.0, r10285. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-815-2022>.
- Madzhi, N., & Akhsan, M. 2021. Control of Plant Growth by Monitoring Soil Moisture, Temperature and Humidity in Dry Climate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1192. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1192/1/012027>.
- Mahmud, K., Makaju, S., Ibrahim, R., & Missaoui, A. 2020. Current Progress in Nitrogen Fixing Plants and Microbiome Research. *Plants*, 9. <https://doi.org/10.3390/plants9010097>.
- MALAVOLTA, E. – ABC da Adubação. Editora Agronômica CERES Ltda. São Paulo (SP), 1979. 256 p.
- Malhotra, H., Vandana, Sharma, S., & Pandey, R. 2018. Phosphorus nutrition: plant growth in response to deficiency and excess. *Plant nutrients and abiotic stress tolerance*, 171-190. https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8_7.
- Malyukova, L., Pritula, Z., Kozlova, N., Velikiy, A., Rogozhina, E., Kerimzade, V., & Samarina, L. 2021. Effects of calcium-containing natural fertilizer on *Camellia sinensis* (L.) Kuntze. *Bangladesh Journal of Botany*, 50, 179-187. <https://doi.org/10.3329/BJB.V50I1.52686>.

- Mao, X., Li, Q., Ren, L., Bai, W., & Zhang, W. 2018. Application of molybdenum fertilizer enhanced quality and production of alfalfa in northern China under non-irrigated conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 41, 1009 - 1019. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1431672>.
- Meena, R., Vijayakumar, V., Yadav, G., & Mitran, T. 2018. Response and interaction of *Bradyrhizobium japonicum* and arbuscular mycorrhizal fungi in the soybean rhizosphere. *Plant Growth Regulation*, 84, 207-223. <https://doi.org/10.1007/s10725-017-0334-8>.
- Mendel, R. 2022. The History of the Molybdenum Cofactor—A Personal View. *Molecules*, 27. <https://doi.org/10.3390/molecules27154934>.
- Menza, N., Monzon, J., Lindquist, J., Arkebauer, T., Knops, J., Unkovich, M., Specht, J., & Grassini, P. 2020. Insufficient nitrogen supply from symbiotic fixation reduces seasonal crop growth and nitrogen mobilization to seed in highly productive soybean crops. *Plant, Cell & Environment*, 43, 1958 - 1972. <https://doi.org/10.1111/pce.13804>.
- Merajipoor, M., Dehnavi, M., Salehi, A., & Yadavi, A. 2020. Improving grain yield, water and nitrogen use efficiency of *Nigella sativa* with biological and chemical nitrogen under different irrigation regimes. *Scientia Horticulturae*, 260, 108869. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108869>.
- Mirdad, Z. M. 2016. Effect of N fertigation rates and humic acid on the productivity of crisphead lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown in sandy soil. *Journal of Agricultural Science*, 8(8), 149-157.
- Mirdad, Z. M. 2016. Effect of N fertigation rates and humic acid on the productivity of crisphead lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown in sandy soil. *Journal of Agricultural Science*, 8(8), 149-157. Effect of Molybdenum Rate on Yield and Quality of Lettuce, Escarole, and Curly Endive Grown in a Floating System. *Agronomy*. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY8090171>.
- Moussa, M., Sun, X., Ismael, M., Elyamine, A., Rana, M., Syaifudin, M., & Hu, C. 2021. Molybdenum-Induced Effects on Grain Yield, Macro–micro-nutrient Uptake, and Allocation in Mo-Inefficient Winter Wheat. *Journal of Plant Growth Regulation*, 41, 1516 - 1531. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10397-0>.
- Moussa, M., Sun, X., Ismael, M., Elyamine, A., Rana, M., Syaifudin, M., & Hu, C. 2021. Molybdenum-Induced Effects on Grain Yield, Macro–micro-nutrient Uptake, and Allocation in Mo-Inefficient Winter Wheat. *Journal of Plant Growth Regulation*, 41, 1516 - 1531. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10397-0>.

- Movalia, J., Donga, S., & Parmar, K. 2020. Effect of Boron and Molybdenum on Summer Green Gram (*Vigna Radiata* L.) (GM-4) Under Medium Black Calcareous Soils: A Review. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3585103>.
- Muratore, C., Espen, L., & Prinsi, B. 2021. Nitrogen Uptake in Plants: The Plasma Membrane Root Transport Systems from a Physiological and Proteomic Perspective. *Plants*, 10. <https://doi.org/10.3390/plants10040681>.
- Muratore, C., Espen, L., & Prinsi, B. 2021. Nitrogen uptake in plants: The plasma membrane root transport systems from a physiological and proteomic perspective. *Plants*, 10(4), 681. <https://doi.org/10.3390/plants10040681>.
- Naghdyzadegan Jahromi, M., Razzaghi, F., & Zand-Parsa, S. 2023. Strategies to increase barley production and water use efficiency by combining deficit irrigation and nitrogen fertilizer. *Irrigation Science*, 41(2), 261-275. <https://doi.org/10.1007/s00271-022-00811-0>
- Nazir, F., Mahajan, M., Khatoon, S., Albaqami, M., Ashfaque, F., Chhillar, H., Chopra, P., & Khan, M. 2023. Sustaining nitrogen dynamics: A critical aspect for improving salt tolerance in plants. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1087946>.
- Neina, D. The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation. *Applied and environmental soil science*, v. 2019, p. 1-9, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5794869>
- Nie, Z., Nie, Z., Hu, C., Tan, Q., & Sun, X. 2016. Gene expression related to molybdenum enzyme biosynthesis in response to molybdenum deficiency in winter wheat. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 16, 0-0. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162016005000071>.
- O'Brien, J., Vega, A., Bouguyon, E., Krouk, G., Gojon, A., Coruzzi, G., & Gutiérrez, R. (2016). Nitrate Transport, Sensing, and Responses in Plants. *Molecular plant*, 9 6, 837-56. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2016.05.004>.
- Oliveira, S., Crusciol, C., Rodrigues, V., Galeriani, T., Portugal, J., Bossolani, J., Moretti, L., Calonego, J., & Cantarella, H. 2022. Molybdenum Foliar Fertilization Improves Photosynthetic Metabolism and Grain Yields of Field-Grown Soybean and Maize. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.887682>.
- Oresca, D., de Oliveira, A. C., da Silva, T. G. F., Pessoa, L. G. M., de Souza, J. C. G., & Maciel, L. H. 2021. Agronomic performance of forage sorghum and millet grown under irrigation with saline water and nitrogen doses in the Brazilian semiarid. *Research, Society and Development*, 10(10), 1-18. DOI: 10.33448/rsd-v10i10.18976.

- Osório, C. R. W. S., Teixeira, G. C. M., Barreto, R. F., Campos, C. N. S., Leal, A. J. F., Teodoro, P. E., & Prado, R. M. 2020. Macronutrient deficiency in snap bean considering physiological, nutritional, and growth aspects. *PLoS One*, 15(6), e0234512. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0234512>.
- Otálora, G., Piñero, M. C., López-Marín, J., Varó, P., & del Amor, F. M. 2018. Effects of foliar nitrogen fertilization on the phenolic, mineral, and amino acid composition of escarole (*Cichorium endivia* L. var. *latifolium*). *Scientia Horticulturae*, 239, 87-92. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.05.031>
- Padilla, F., Farneselli, M., Gianquinto, G., Tei, F., & Thompson, R. 2020. Monitoring nitrogen status of vegetable crops and soils for optimal nitrogen management. *Agricultural Water Management*, 241, 106356-106368. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106356>.
- Pascale, S., Rouphael, Y., Gallardo, M., & Thompson, R. B. 2018. Water and fertilization management of vegetables: State of art and future challenges. *Eur. J. Hortic. Sci*, 83(5), 306-318. <https://doi.org/10.17660/EJHS.2018/83.5.4>.
- Patil, A. 2016. Variation of Micro Elements in Shirala Tahsil of Black Soil by Using Spent Wash. *Imperial journal of interdisciplinary research*, v.1 n.2.
- Paudel, M., Adhikari, K., Subedi, B., Gairhe, J., Vista, S., & Lamichhane, S. 2020. Assessment of the Relationship Between Soil pH and Macronutrients at Baseshwor, Sindhuli. *Journal of the Institute of Agriculture and Animal Science*. <https://doi.org/10.3126/jiaas.v36i1.48426>.
- Pegoraro, R. F., Almeida Neta, M. N. D., Costa, C. A. D., Sampaio, R. A., Fernandes, L. A., & Neves Rodrigues, M. 2018. Chickpea production and soil chemical attributes after phosphorus and molybdenum fertilization. *Ciência e Agrotecnologia*, 42, 474-483. <https://doi.org/10.1590/1413-70542018425011618>
- Peralta-Sánchez, M. G., Gómez-Merino, F. C., Tejeda-Sartorius, O., & Trejo-Téllez, L. I. 2023. Nitrogen Nutrition Differentially Affects Concentrations of Photosynthetic Pigments and Antioxidant Compounds in Mexican Marigold (*Tagetes erecta* L.). *Agriculture*, 13(3), 517. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030517>.
- Ramakrishna, W., Yadav, R., & Li, K. 2019. Plant growth promoting bacteria in agriculture: Two sides of a coin. *Applied Soil Ecology*. <https://doi.org/10.1016/J.APSOIL.2019.02.019>
- Rana, M. S., Sun, X., Imran, M., Khan, Z., Moussa, M. G., Abbas, M., ... & Hu, C. 2020. Mo-inefficient wheat response toward molybdenum supply in terms of soil phosphorus availability.

Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 20, 1560-1573. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00298-8>

Rana, M., Sun, X., Imran, M., Ali, S., Shaaban, M., Moussa, M., Khan, Z., Afzal, J., Binyamin, R., Bhandari, P., Alam, M., Din, I., Younas, M., & Hu, C. 2020. Molybdenum-induced effects on leaf ultra-structure and rhizosphere phosphorus transformation in *Triticum aestivum* L. *Plant physiology and biochemistry: PPB*, 153, 20-29. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.05.010>.

Recena, R., Fernández-Cabanás, V. M., & Delgado, A. 2019. Soil fertility assessment by Vis-NIR spectroscopy: Predicting soil functioning rather than availability indices. *Geoderma*, 337, 368-374. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2018.09.049>.

Rosa, F. L. D., Yamashita, O. M., Carvalho, M. C. D., Dallacort, R., Rocha, A. M. D., & Mera, L. D. P. 2021. Doses and times of nitrogen application via leaf in the production of corn for silage in the Southern Amazon. *Revista De La Facultad De Agronomia De La Universidad Del Zulia*, 241-260. [https://doi.org/10.47280/REVFACAGRON\(LUZ\).V38.N2.02](https://doi.org/10.47280/REVFACAGRON(LUZ).V38.N2.02).

Rusinamhodzi, L. 2020. Managing Crop Rotations in No-till Farming Systems., 21-31. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46409-7_2.

Sajjad, N., Bhat, E. A., Shah, D., Manzoor, I., Noor, W., Shah, S., & Ali, R. 2021. Nitrogen uptake, assimilation, and mobilization in plants under abiotic stress. In *Transporters and Plant Osmotic Stress*, pp. 215-233. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817958-1.00015-3>.

Salvi, S., Shelke, P., Sayed, A. R., & Ansari, N. 2021. Soil Monitoring and Recommendation System. In *Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Science & Technology (ICAST2021)*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3868690>.

Santos, E. F., Mateus, N. S., Rosario, M. O., Garcez, T. B., Mazzafera, P., & Lavres, J. 2021. Enhancing potassium content in leaves and stems improves drought tolerance of eucalyptus clones. *Physiologia Plantarum*, 172(2), 552-563. <https://doi.org/10.1111/ppl.13228>.

Santos, R. L. D., Freire, F. J., Oliveira, E. C. A. D., Freire, M. B. G. D. S., West, J. B., Barbosa, J. D. A., & Bezerra, P. D. C. 2019. Atividade da nitrato redutase e acúmulo de nitrogênio e biomassa em cana-de-açúcar sob adubação com molibdênio e nitrogênio. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 43. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20180171>

Santos, R. L. D., Freire, F. J., Oliveira, E. C. A. D., Simões Neto, D. E., Medeiros, M. R. F. A. D., Bezerra, P. D. C., ... & Santos, N. D. L. 2018. Productivity and technological quality of sugarcane

- under fertilization of nitrogen and molybdenum. *Journal of soil science and plant nutrition*, 18(4), 1002-1020. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162018005002901>
- Santos, R., Freire, F., Oliveira, E., Trivelin, P., Freire, M., Bezerra, P., Oliveira, R., & Santos, M. 2019. Changes in Biological Nitrogen Fixation and Natural-Abundance N Isotopes of Sugarcane Under Molybdenum Fertilization. *Sugar Tech*, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s12355-019-00717-w>.
- Santos, W. F., Junior, J. C. F., da Silva, A. G., Procópio, S. D. O., Braz, G. B. P., Jakelaitis, A. & Rodrigues, RLS 2022. Arranjo de plantas e fertilização com nitrogênio na produção de sorgo grão. *Revista Brasileira de Trigo e Sorgo*, 21. <https://doi.org/10.18512/rbms2022v21e1262>
- Saravanan, S., & Kamarasan, M. 2018. A review on pH level determination of soil using image processing techniques. *Journal of emerging technologies and innovative research.*, v.5
- Sardar, H., Khalid, Z., Ahsan, M., Naz, S., Nawaz, A., Ahmad, R., Razzaq, K., Wabaidur, S., Jacquard, C., Širić, I., Kumar, P. e Fayssal, S. 2023. Aumento da tolerância ao estresse salino em alface (*Lactuca sativa* L.) via aplicação foliar de óxido nítrico. *Plantas*, 12. <https://doi.org/10.3390/plants12051115>.
- Schogolev, A. S., & Raievska, I. M. 2021. Role of nitrogen deficiency on growth and development near isogenic by E genes lines of soybean co-inoculated with nitrogen-fixing bacteria. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 12(2), 326-334. <https://doi.org/10.15421/022144>.
- Schröder, P., Sauvêtre, A., Gnädinger, F., Pesaresi, P., Chmeliková, L., Doğan, N., ... & Terzi, V. 2019. Discussion paper: Sustainable increase of crop production through improved technical strategies, breeding and adapted management—A European perspective. *Science of the Total Environment*, 678, 146-161. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.212>
- Selim, S., Hassan, Y., Saleh, A., Habeeb, T., & AbdElgawad, H. 2019. Actinobacterium isolated from a semi-arid environment improves the drought tolerance in maize (*Zea mays* L.). *Plant physiology and biochemistry: PPB*, 142, 15-21. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.06.029>.
- Serna, L. 2022. Maize stomatal responses against the climate change. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.952146>.
- Shilpha, J.; Canção, J.; Jeong, B. R. 2023. Fitotoxicidade e tolerância ao amônio: uma visão sobre a nutrição do amônio para melhorar a produtividade das culturas. *Agronomia*, v. 13, n. 6, pág. 1487. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061487>

- Sihi, D., Dari, B., Sharma, D., Pathak, H., Nain, L., & Sharma, O. 2017. Evaluation of soil health in organic vs. conventional farming of basmati rice in North India. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 180, 389-406. <https://doi.org/10.1002/JPLN.201700128>.
- Silber, A. et al. Nitrogen uptake and macronutrients distribution in mango trees (cv. Keitt) under three N fertigation treatments. *BioRxiv*, p. 2021.07. 13.452282, 2021.
- Singh, A., Gupta., S., Dwivedi, K., & Kunwar, N. 2018. Women in agriculture play a huge role in preparation of soil for healthy life. *International journal of home science*, 4, 33-36.
- Singh, A., Pandey, A., & Singh, U. 2020. Effect of integrated nutrient management practices on soil chemical properties: A review. *International Journal of Chemical Studies*, 8, 3438-3441. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i4aq.10186>.
- Soualiou, S., Duan, F., Li, X., & Zhou, W. 2023. Nitrogen supply alleviates cold stress by increasing photosynthesis and nitrogen assimilation in maize seedlings. *Journal of Experimental Botany*, 74(10), 3142-3162. <https://doi.org/10.1093/jxb/erad073>.
- Souček, J., Bjelková, M., Burg, P., & Jasinskas, A. 2021. Using distant monitoring methods for the cultivation of cannabis. In *Proceedings of the International Scientific Conference Rural Development*, pp. 171-175. <https://doi.org/10.15544/rd.2021.027>.
- Soumare, A., Diedhiou, A. G., Thuita, M., Hafidi, M., Ouhdouch, Y., Gopalakrishnan, S., & Kouisni, L. 2020. Exploiting biological nitrogen fixation: a route towards a sustainable agriculture. *Plants*, 9(8), 1011. <https://doi.org/10.3390/plants9081011>
- Steiner, F., Zoz, T., Zuffo, AM, Pereira-Machado, P., Zoz, J., & Zoz, A. 2018. Foliar application of molybdenum improves the productivity and nutritional quality of curly lettuce (*Lactuca sativa* L., cv. Grand Rapids). *Acta Agronomic*, 67 (1), 73-79.
- Syed, S., Wang, X., Prasad, T. N., & Lian, B. 2021. Bio-organic mineral fertilizer for sustainable agriculture: current trends and future perspectives. *Minerals*, 11(12), 1336. <https://doi.org/10.3390/min11121336>.
- Tavakol, E., Jákli, B., Cakmak, I., Dittert, K., Karlovsky, P., Pfohl, K., & Senbayram, M. 2018. Optimized potassium nutrition improves plant-water-relations of barley under PEG-induced osmotic stress. *Plant and Soil*, 430, 23-35. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3704-8>.
- Tejaswini, B. H., Singh, R., Indu, T., & Pradhan, A. 2023. Effect of Molybdenum and Sulphur on Growth and Yield of Summer Black Gram (*Vigna mungo* L.). *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(2), 50-54. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i21652>.

- Theresa, K., Shanmugasundaram, R., & Kennedy, J. S. 2019. Dynamic Changes in Soil Physico-Chemical Properties with the Application of Inorganic Fertilizers. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, 8(8), 2111-2122. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.808.247>.
- Threatt, S., & Rees, D. 2022. Biological nitrogen fixation in theory, practice, and reality: a perspective on the molybdenum nitrogenase system. *FEBS Letters*, 597. <https://doi.org/10.1002/1873-3468.14534>.
- Tokasheva, D. S., Nurbekova, Z. A., Akbassova, A. Z., & Omarov, R. T. (2021). Molybdoenzyme participation in plant biochemical processes. *Eurasian Journal of Applied Biotechnology*, (1). <https://doi.org/10.11134/btp.1.2021.2>.
- Tripathi, R., Tewari, R., Singh, K., Keswani, C., Minkina, T., Srivastava, A., Corato, U., & Sansinenea, E. 2022. Plant mineral nutrition and disease resistance: A significant linkage for sustainable crop protection. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.883970>.
- Vannier, N., Agler, M., & Hacquard, S. 2019. Microbiota-mediated disease resistance in plants. *PLoS Pathogens*, 15. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1007740>.
- Wang, J., & Wen, X. 2022. Limiting resource and leaf functional traits jointly determine distribution patterns of leaf intrinsic water use efficiency along aridity gradients. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.909603>.
- Wang, S., Yang, L., Su, M., Ma, X., Sun, Y., Yang, M., ... & Liu, X. 2019. Increasing the agricultural, environmental and economic benefits of farming based on suitable crop rotations and optimum fertilizer applications. *Field Crops Research*, 240, 78-85. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2019.06.010>.
- Wang, Y., Wang, J., Dong, E., Liu, Q., Wang, L., Chen, E., Jiao, X., & Diao, X. 2023. Foxtail millet [*Setaria italica* (L.) P. Beauv.] grown under nitrogen deficiency exhibits a lower folate contents. *Frontiers in Nutrition*, 10. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1035739>.
- Wang, Y., Yao, Z., Zhan, Y., Zheng, X., Zhou, M., Yan, G., Wang, L., Werner, C., & Butterbach-Bahl, K. 2021. Potential benefits of liming to acid soils on climate change mitigation and food security. *Global Change Biology*, 27. <https://doi.org/10.1111/gcb.15607>.
- Xiao, K., Li, D., Wen, L., Yang, L., Luo, P., Chen, H., & Wang, K. 2018. Dynamics of soil nitrogen availability during post-agricultural succession in a karst region, southwest China. *Geoderma*, 314, 184-189. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2017.11.018>.

- Xiaochuang, C., Chu, Z., Chunquan, Z., Junhua, Z., Lianfeng, Z., Lianghuan, W., & Qianyu, J. 2019. Variability of leaf photosynthetic characteristics in rice and its relationship with resistance to water stress under different nitrogen nutrition regimes. *Physiologia plantarum*, 167(4), 613-627. <https://doi.org/10.1111/ppl.12909>.
- Yang, X. D., Wu, N. C., & Gong, X. W. 2023. Plant Adaptation to Extreme Environments in Drylands. *Forests*, 14(2), 390. <https://doi.org/10.3390/f14020390>.
- Yeganehpoor, F., Zehtab-Salmasi, S., Shafagh-Kolvanagh, J., Ghassemi-Golezani, K., & Dastborhan, S. 2019. Can application of nitrogen fertilizers and salicylic acid improve growth and fruit yield of coriander under water deficit? *Acta Scientiarum Polonorum. Hortorum Cultus*, 18(3). <https://doi.org/10.24326/asphc.2019.3.9>.
- Yokobe, T., Hyodo, F., & Tokuchi, N. 2018. Seasonal effects on microbial community structure and nitrogen dynamics in temperate forest soil. *Forests*, 9, 153. <https://doi.org/10.3390/F9030153>.
- Zargar, M., Tumanyan, A., Ivanenko, E., Dronik, A., Tyutyuma, N., & Pakina, E. 2019. Impact of foliar fertilization on apple and pear trees in reconciling productivity and alleviation of environmental concerns under arid conditions. *Communicative & Integrative Biology*, 12, 1 - 9. <https://doi.org/10.1080/19420889.2019.1565252>.
- Zhang, K.; Maltais-Landry, G.; Liao, H. 2021. How soil biota regulates C cycling and soil C pools in diversified crop rotations. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 156, p. 108219. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108219>
- Zhang, L., Wang, L., Sun, Y., Dong, X., Wei, Z., Zhang, L., & Shi, Y. 2023. Opposite Root Morphological Responses of Chinese Cabbage to Poly- γ -glutamic Acid When Applied with Urea and Ammonium Sulphate. *Agronomy*, 13(2), 608. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020608>.
- Zhang, Y., Wang, S., Wang, H., Wang, R., Wang, X., & Li, J. (2018). Crop yield and soil properties of dryland winter wheat-spring maize rotation in response to 10-year fertilization and conservation tillage practices on the Loess Plateau. *Field Crops Research*, 225, 170-179. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2018.07.003>.
- Zhao, J., Yang, Y., Zhang, K., Jeong, J., Zeng, Z., & Zang, H. 2020. Does crop rotation yield more in China? A meta-analysis. *Field Crops Research*, 245, 107659. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107659>.
- Zhao, L., Liu, F., Crawford, N., & Wang, Y. 2018. Molecular Regulation of Nitrate Responses in Plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 19. <https://doi.org/10.3390/ijms19072039>.

Zhou, J., Sun, X., Chen, C., & Chen, J. 2023. The Effect of Molybdenum Fertilizer on the Growth of Grass–Legume Mixtures Related to Symbiotic Rhizobium. *Agronomy*, 13(2), 495. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020495>.

Zveushe, O. K., de Dios, V. R., Zhang, H., Zeng, F., Liu, S., Shen, S., ... & Dong, F. (2023). Effects of Co-inoculating *saccharomyces* spp. with *bradyrhizobium japonicum* on atmospheric nitrogen fixation in soybeans (*Glycine max* (L.)). *Plants*, 12(3), 681. <https://doi.org/10.3390/plants12030681>.

Zveushe, O. K., de Dios, V. R., Zhang, H., Zeng, F., Liu, S., Shen, S., ... & Dong, F. (2023). Effects of Co-inoculating *saccharomyces* spp. with *bradyrhizobium japonicum* on atmospheric nitrogen fixation in soybeans (*Glycine max* (L.)). *Plants*, 12(3), 681. <https://doi.org/10.3390/plants12030681>.

CAPITULO 2: INCREMENTOS PRODUTIVOS DO SORGO FORRAGEIRO SOB DÉFICIT HÍDRICO E ADUBAÇÃO NITROGENADA E MOLIBDICA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

RESUMO: A escassez hídrica, atrelada a baixa fertilidade dos solos, constituem um dos principais fatores na limitação da produtividade das culturas em regiões semiáridas. No entanto, técnicas de suplementação nutricional com nitrogênio e molibdênio podem proporcionar incrementos positivos na produção dessas culturas. Com isso, objetivou-se avaliar o efeito de doses crescentes de nitrogênio na presença e/ou ausência de molibdênio no incremento produtivo do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico no semiárido. O experimento foi conduzido em campo utilizando o delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições, em esquema fatorial 5 x 2 x 3, referentes a cinco doses de nitrogênio (ureia): 0, 50, 100, 150, 300 kg ha⁻¹, duas doses de molibdênio (molibdato de sódio): 0 e 160 g ha⁻¹ e três ciclos de produção. Ao final de cada ciclo, foi avaliado a atividade de enzimas antioxidantes (dismutase, ascorbato peroxidase e catalase), extração e teores de nitrogênio total (Nt), molibdênio (Mo), potássio (K), cloreto (Cl), condutância estomática (gs), eficiência no uso da água (EUA) e produção de massa verde (MV) e seca (MS). A atividade enzimática da CAT foi afetada pelas crescentes doses de N e Mo de forma isolada, com maior atividade na dosagem de 300 kg ha⁻¹ de N e 160 g ha⁻¹ de Mo. As maiores produtividades de MV (46,28 Mg ha⁻¹), MS (18,9 Mg ha⁻¹) e EUA (5,34 kg/ m³) ocorreram na maior dosagem de N (300 Kg ha⁻¹ N). Os maiores teores e extração de N total, Mo, Cl e K foram encontrados na rebrota 2 e na maior dose de N (300 kg ha⁻¹). A interação do N e Mo proporcionou maior atividade da enzima CAT. O N mitigou os efeitos deletérios ocasionado pelo déficit hídrico no sorgo. As condições meteorológicas dos ciclos influenciaram fortemente nos teores e extração dos nutrientes. As doses de N proporcionaram aumento nas variáveis de produção.

Palavras-chave: *Sorghum bicolor*, estresse hídrico, ureia, molibdato de sódio, danos oxidativos.

ABSTRACT: Water scarcity, coupled with low soil fertility, constitutes one of the main limiting factors for crop productivity in semi-arid regions. However, techniques of nutritional supplementation with nitrogen and molybdenum can provide positive increments in the production of these crops. Therefore, the aim was to evaluate the effect of increasing doses of nitrogen in the presence and/or absence of molybdenum on the activity of antioxidant enzymes and productive enhancement of forage sorghum subjected to water deficit in the semi-arid region. The experiment was conducted in the field using a randomized block design, with four replications, in a 5 x 2 x 3 factorial scheme, referring to five doses of nitrogen (urea): 0, 50, 100, 150, 300 kg ha⁻¹, two doses of molybdenum (sodium molybdate): 0 and 160 g ha⁻¹, and three production cycles. The activity of

antioxidant enzymes (dismutase, ascorbate peroxidase, and catalase), extraction and levels of total nitrogen (Nt), molybdenum (Mo), potassium (K), chloride (Cl), stomatal conductance (gs), water use efficiency (WUE), and production of green mass (GM) and dry mass (DM) were evaluated. CAT enzymatic activity was affected by increasing doses of N and Mo separately, with higher activity at a dosage of 300 kg ha⁻¹ of N and 160 g ha⁻¹ of Mo. The highest yields of GM (46.28 Mg ha⁻¹), DM (18.9 Mg ha⁻¹), and WUE (5.34 kg/m³) occurred at the highest N dosage (300 kg ha⁻¹ N). The highest levels and extraction of total N, Mo, Cl, and K were found in the second regrowth and at the highest N dose (300 kg ha⁻¹). The interaction of N and Mo provided greater CAT enzyme activity. N mitigated the deleterious effects caused by water deficit in sorghum. The weather conditions of the cycles strongly influenced the levels and extraction of nutrients. N doses provided an increase in production variables.

Keywords: Sorghum bicolor, water stress, urea, sodium molybdate, oxidative damage.

1. INTRODUÇÃO

O sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor* (L.) Moench.) é uma planta amplamente utilizada em várias regiões do mundo (OSTMEYER et al., 2023), possuindo características agronômicas desejáveis como, elevado rendimento forrageiro, capacidade de rebrota, produção de biomassa, e principalmente adaptabilidade às regiões secas, permitindo assim a sua sobrevivência e produção em longos períodos de estiagem (ALVES et al., 2016). Devido as suas características, essa cultura é predominantemente cultivada em regiões áridas e semiáridas, as quais são caracterizadas pela escassez hídrica. Embora seja moderadamente tolerante a essas condições, o sorgo ainda pode ser afetado por alterações nos parâmetros fisiológicos através da redução na abertura estomática (gs), bem como os bioquímicos proporcionados pelas espécies reativas de oxigênio (EROS) (OLDEN et al., 2020), culminando na diminuição significativa do crescimento, produção de biomassa e qualidade da cultura. (BOH et al., 2021).

O manejo de fertilizantes em diferentes ambientes de estresse, atribui uma maior tolerância a planta melhorando seu estado nutricional (KAZEMI et al., 2022). Estudos apontam que a adição de nitrogênio beneficiou o rendimento do sorgo (*Sorghum bicolor*) e milho (*Zea mays*) cultivados sob déficit hídrico, elevando o conteúdo de água na planta e reduzindo os danos à membrana e a produção de espécies reativas de oxigênio (NEMATPOUR et al., 2023). Ahmad et al., (2022), constataram que o aumento nas doses de N no sorgo promoveu maior atividade das enzimas catalase (CAT), ascorbato peroxidase (APX) e peróxido dismutase (SOD) podendo ser um mecanismo de defesa utilizado pela cultura para regular o crescimento em ambientes de estresse.

A fertilização é uma prática essencial na agricultura para garantir a segurança alimentar global. De acordo com um relatório da Fertilizers Europe (Guzal-Dec et al., 2021), 50% dos alimentos do mundo são produzidos com fertilizantes agrícolas. Entre esses, destaca-se o nitrogênio (N) pois atua na regulação fisiológica das plantas (Li Y et al., 2022), no crescimento (Lamichhane et al., 2021 e Horschutz et al., 2022), na eficiência hídrica e na produção de biomassa (Silva et al., 2023 e Nematpour, 2023). O manejo inadequado desse macronutriente pode resultar em perdas por lixiviação e volatilização, além de danos à cultura quando aplicado de forma deficiente ou excessiva, reduzindo sua eficiência de uso pela planta (The et al., 2021). Portanto, para um manejo de N mais eficiente, os agricultores devem considerar as necessidades da planta cultivada e as condições do solo, além de usar técnicas de manejo da água, como a irrigação por gotejamento localizado, que pode ajudar a reduzir a lixiviação de N (Hou et al., 2023), mantendo-o disponível para as plantas.

As formas de fornecimento e assimilação do N estão atreladas a presença do micronutriente molibdênio (Mo). Esse nutriente atua como cofator das enzimas nitrogenase (responsável pela fixação biológica do nitrogênio pelas rizóbios) e nitrato redutase (responsável pela redução do nitrato (NO_3^-) a nitrito (NO_2^-), desempenhando um papel crucial no metabolismo do N na planta (JARECKI et al., 2023). A restrição do Mo em áreas de cultivo pode ocasionar redução na produção agrícola, (RASHID e RYAN, 2004), sendo recomendado a sua aplicação via foliar (JARECKI et al., 2023). Já existem relatos na literatura comprovando a importância da utilização de N e Mo no incremento produtivo dos gêneros Fabaceae (NASAR et al., 2022, LI et al., 2023), Rubiaceae (ROSADO et al., 2021) e Poaceae (SANTOS et al., 2022, NETO et al., 2023).

Entretanto, conhecimentos sobre a ação em conjunto desses nutrientes no incremento produtivo do sorgo forrageiro sob déficit hídrico em regiões semiáridas ainda são escassos. Dúvidas sobre quais doses de N e Mo podem ser utilizadas para atribuir maior tolerância ao sorgo nessas condições e assim não afetar a produtividade dessa cultura, ainda não foram elucidadas dificultando assim a introdução sinérgica desses nutrientes nos cultivos agrícola dessas regiões. Sendo assim, visto que o manejo adequado de fertilizantes em ambientes de estresse pode promover maior tolerância as plantas, acredita-se que a suplementação com nitrogênio e molibdênio, mitigarão os efeitos deletérios ocasionado pelo déficit hídrico no sorgo forrageiro, auxiliando na produtividade dessa cultura em regiões semiáridas.

Com isso, objetivou-se avaliar o efeito de doses crescentes de nitrogênio na presença e/ou ausência de molibdênio no incremento produtivo do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico no semiárido. Os objetivos específicos desse estudo se basearam na avaliação das características agronômicas da cultura como produção de biomassa, capacidade de rebrota, comprimento e largura de folhas, altura de planta, qualidade da forragem que pode ser atribuída a extração e teores de

nutrientes na planta, além da tolerância em ambientes de baixa disponibilidade hídrica, que pode ser indicado pela atividade das enzimas antioxidantes.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O experimento foi desenvolvido entre os períodos de julho de 2022 a maio de 2023, em condição de campo na área agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UFRPE/UAST), situada na cidade de Serra Talhada, Pernambuco (PE). A área experimental está localizada na latitude 7° 59' 7" Sul, longitude 38° 17' 34" Oeste e 443 metros de altitude (Figura 1).

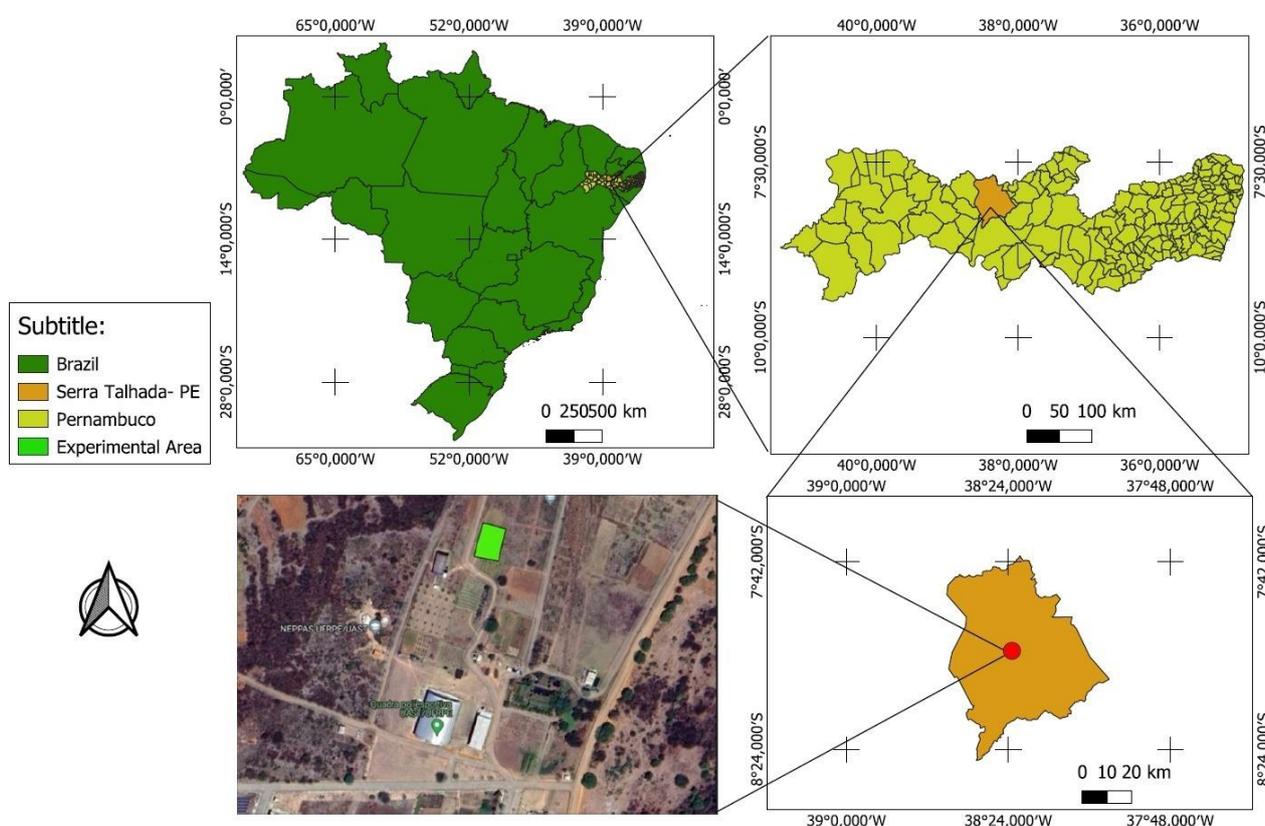


Figura 1. Localização da área experimental na Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Serra Talhada - PE, Brasil. (Fonte: Autores, 2024)

2.2 Caracterização do clima e solo

De acordo com a classificação de Köppen, o clima local é do tipo BSw^h' (ALVARES et al., 2013), sendo denominado semiárido quente e seco, com chuvas de verão, iniciando em dezembro com término em abril. A precipitação pluvial média anual é de 632 mm com temperaturas do ar médias mensais variando entre 23,6 e 27,7°C, temperaturas mínimas entre 18,4 e 21,6°C e temperaturas mais elevadas com valores superiores a 32°C (JARDIM et al., 2019). A distribuição da

precipitação durante o período do experimento (Figura 2) ocorreu de maneira irregular, havendo períodos de escassez hídrica e outros com elevados volumes.

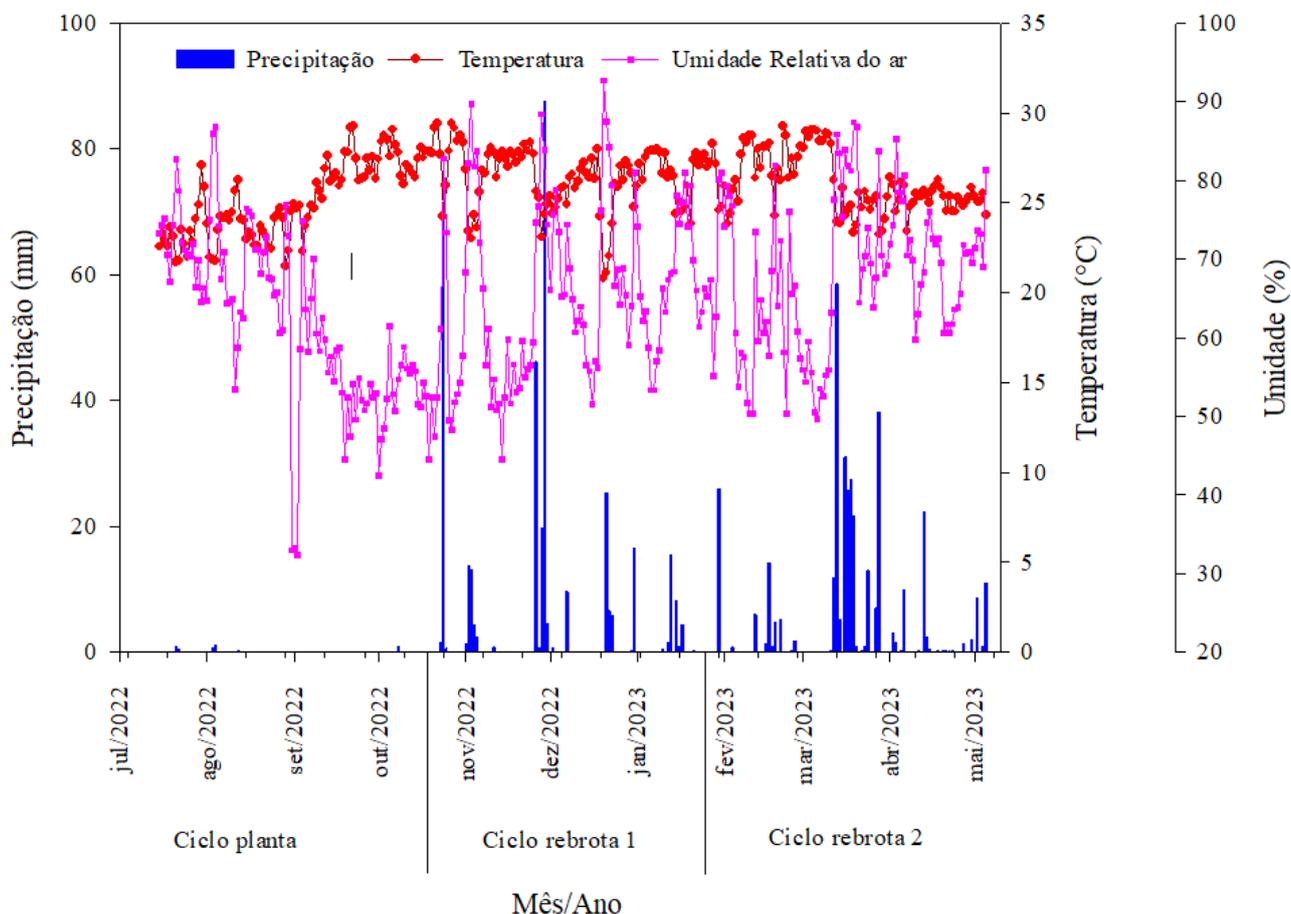


Figura 2. Valores de precipitação pluviométrica, temperatura média e umidade relativa média do ar durante os ciclos consecutivos de cultivo do sorgo forrageiro (cv. SF 15) submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio e molibdênio, Serra Talhada-PE.

Para a análise do solo, foram coletadas em 15 pontos aleatórios amostras simples de solos nas camadas de 0-20 e de 20-40 cm. Em seguida, essas amostras simples foram misturadas de acordo com suas respectivas profundidades e homogeneizadas afim de obter amostras compostas, as quais foram caracterizadas fisicamente e quimicamente (Tabela 1), de acordo com a metodologia proposta pela Embrapa (2018). O solo foi classificado como Cambissolo Háplico Ta Eutrófico Típico (SANTOS et al., 2013).

Tabela 1. Resultados da análise química e física do solo coletado de 0 a 40 cm antes da instalação do experimento, Serra Talhada, PE 1

Cam.	Atributos químicos														
	P	pH	K	Mo	Na	Al	Ca	RAS	Mg	H+Al	SB	CTC	V	PST	M.O
cm	mg/dm ³				cmol/dcm ³										%
0-20	38,3	6,71	0,48	<LQ	0,11	0	3,61	0,09	2,61	0,47	6,81	7,28	93,54	1,51	1,14
20-40	38,8	6,74	0,4	<LQ	0,19	0	3,9	0,14	2,67	0,5	7,16	7,66	93,47	2,48	0,94

Cam	Atributos físicos										
	DS	DP	PT	AN	GF	AT	AG	AF	Silte	Argila	
cm	g/cm ³		%			%					
0-20	1,61	2,53	36,26	4,32	59	73,6	44,5	29,1	15,9	10,5	
20-40	1,66	2,47	32,8	4,39	58,31	72,2	48,88	23,34	17,2	10,5	

Cam.-Camadas; P-Fósforo; pH- Potencial hidrogeniônico; K- Potássio; Mo- Molibdênio; Na- Sódio; Al- Alumínio; Ca- Cálcio; RAS- Relação de Adsorção de Sódio; Mg- Magnésio; H+Al- Acidez potencial, SB- Soma de bases; CTC-Capacidade de troca de cátions; V- Saturação por base; PST-Percentagem de sódio trocável, MO- Matéria Orgânica; LQ- Limite de quantificação; DS = Densidade do solo; DP = Densidade de partícula; PT = Porosidade total; AN = Areia natural; GF = Grau de flocculação; AT = Areia total; AG = Areia Grossa; AF = Areia fina.

2.3 Implantação da cultura e aplicação dos tratamentos

O experimento foi implantado avaliando três ciclos consecutivos do sorgo forrageiro cv. SF 15. O semeio foi realizado no dia 15 de junho de 2022 em sulcos localizados ao lado das fitas gotejadoras, com espaçamento de 0,75 m entre fileiras e 0,20 m entre plantas, utilizando em média 30 sementes por metro linear. Aos 20 dias após a emergência foi realizado o desbaste, deixando em média 15 plantas por metro linear.

Os tratamentos com a adubação nitrogenada consistiram na aplicação de 50, 100, 150 e 300 kg ha⁻¹ de N via solo, referente a 33 g, 66 g, 100 g e 200 g, respectivamente, sendo adicionado o tratamento controle, ou seja, sem a aplicação de nitrogênio. No manejo da adubação nitrogenada, os tratamentos foram aplicados de modo parcelado, sendo 1/3 da aplicação no sulco de semeio e os 2/3 restantes aos 25 dias após a emergência, utilizando a ureia como fonte de N. Logo após a aplicação, a ureia foi coberta com solo a fim de evitar perda por volatilização. A adubação molibídica ocorreu 25 dias após a emergência sendo aplicado 160 g ha⁻¹ de Mo via foliar, utilizando o molibdato de sódio como fonte. O tratamento controle consistiu na ausência desse nutriente.

Ocorreu variação na duração dos ciclos, onde o primeiro ciclo (planta) iniciou no dia 15 de julho de 2022 com duração de 108 dias, o segundo (rebrotas 1) com 90 dias e o terceiro (rebrotas 2) com 99 dias. Vale ressaltar que ao final de cada ciclo de produção da cultura, os tratamentos e avaliações foram repetidos.

2.4 Manejo da irrigação deficitária

A lâmina de irrigação foi baseada na Evapotranspiração da Cultura (ET_c), adotando-se um manejo de água sob condições deficitárias. Para isso, a lâmina foi calculada com base no nível de 50 % da ET_c, sendo obtida pela equação $ET_c = ETo \times Kc$, onde ETo é a evapotranspiração de referência e os valores de kc, coeficiente de cultura (inicial = 0,4; fase vegetativa= 0,68; floração=1,14 e maturação fisiológica =1,10). A ETo foi determinada pelo método de Penman Monteith parametrizado no boletim 56 da FAO (ALLEN et al., 1998), expressa na equação abaixo.

$$ETo = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) u_2 (es - e)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}$$

Em que,

ETo - Evapotranspiração de referência (mm d⁻¹);

Rn - Saldo de radiação à superfície (MJ m⁻² d⁻¹);

G - Densidade do fluxo de calor do solo (MJ m⁻² d⁻¹);

T - Temperatura do ar a 2 m de altura (°C);

u₂ - Velocidade de vento a 2 m de altura (m s⁻¹);

es - Pressão de vapor de saturação (kPa);

ea - Pressão parcial de vapor (kPa);

Δ - Declividade da curva de pressão de vapor de saturação (kPa °C⁻¹), e

γ - Coeficiente psicrométrico (kPa °C⁻¹)

Os dados foram coletados de uma estação meteorológica automática localizada a uma Latitude de - 7.954277°, e a uma Longitude de -38.295082°, situada na área experimental da Unidade acadêmica de Serra Talhada. A irrigação era realizada a cada dois dias através do sistema de gotejo, com vazão de 1,5 l/h. A água utilizada para irrigação apresentava as seguintes características: pH= 6.84, Na⁺=0.08 mg/L, K⁺= 0.01 mg/L, Cl⁻= 329.44 mg/L e condutividade elétrica de 1,62 dS/m.

A lâmina total aplicada durante o experimento foi de 1.049 mm, sendo aplicado no ciclo planta 382 mm, na rebrota 1, 325 mm e na rebrota 2, 342 mm.

2.5 Avaliações

2.5.1 Biométricas

Quinze dias após a semeadura do sorgo e dez dias após cada rebrota, foram realizadas seis biometrias ao longo do ciclo da cultura, com um intervalo de doze dias entre cada uma. Na área útil das parcelas, os dados foram coletados de quatro plantas previamente identificadas, incluindo: Altura da Planta (AP), medida a partir da base das plantas, próximo ao solo, até a base das panículas usando uma fita métrica; Comprimento da Folha (CF), medido a partir da interseção da lâmina foliar com o caule até o final da lâmina foliar usando uma fita métrica; Largura da Folha (LF), medida no terço médio da folha usando um paquímetro; e número de folhas vivas (NFV), finalmente contadas, considerando folhas com menos de 50% de sua lâmina foliar em senescência (Rodrigues et al., 2018).

2.6 Produtividade

Para a produtividade foram estimadas a produção de biomassa verde (MV) e seca (MS) da parte aérea, a eficiência no uso da água (EUA) ⁽¹⁾ e eficiência de utilização de nitrogênio (EUN) ⁽²⁾. A MV foi obtida a partir do peso da massa de dose plantas colhidas em cada área útil e extrapolada para Mg ha⁻¹. A produção da MS foi determinada a partir da retirada da umidade dos tecidos colhidos. Para tanto, foi coletada uma subamostra em cada parcela, que posteriormente foi seca em estufa de circulação de ar por 72 horas, sob temperatura de 55°C. A partir da diferença entre o peso da subamostra seca e úmida, foi obtido o valor correspondente ao percentual de matéria seca, sendo posteriormente extrapolado para Mg ha⁻¹. A EUA foi determinada pela razão entre a produção de biomassa total ao longo dos ciclos e a quantidade total de água transpirada pela cultura no mesmo período (FERNÁNDEZ et al., 2022), enquanto a EUN foi determinada pela razão entre a massa seca total e o acúmulo de nitrogênio (SIDDIQI & GLASS, 1981) expressa na equação abaixo:

$$^{(1)}EUAc = \frac{\text{biomassa } \text{kg ha}^{-1}}{ETc} \frac{\text{m}^3 \text{ha}^{-1}}$$

Em que,

EUAc = Eficiência no uso da água (Kg/m³)

ETc= Evapotranspiração da cultura (m³ ha⁻¹)

$$^{(2)}EUN = (\text{Massa seca total } ^2 \text{ (kg)}/\text{Acúmulo de N}^2(\text{kgMs}))/\text{Acúmulo de N (g)}$$

Onde,

EUN= Eficiência de utilização de nitrogênio (Kg²/g)

2.7 Nutricionais

Ao final de cada ciclo foram determinados os teores de nitrogênio total (N total), molibdênio (Mo), cloreto (Cl) e potássio (K). Foram colhidas amostras foliares no campo, onde lavadas com água destilada, sendo posteriormente acondicionadas em sacos Kraft previamente identificados e secas em estufa com circulação de ar forçada a 55 °C até peso constante. Após a secagem, as amostras foram moídas em moinho tipo Wiley passando pela peneira de 2 e 1 mm, para posterior análise dos teores conforme descrito em Embrapa (2009). A extração dos nutrientes foi determinada pela expressão abaixo:

$$EN = (\text{Teor do nutriente, (g kg}^{-1}\text{)}/10/100) \times 1000 \times \text{Massa seca (t ha}^{-1}\text{)}$$

Onde,

EN= Extração do nutriente (kg ha⁻¹);

2.8 Fisiológica

2.8.1 Condutância estomática (gs)

A condutância estomática (gs) foi medida 70 dias após a germinação e rebrota do sorgo, realizada às 8:00 e 10:00 da manhã e às 12:00 e 14:00 da tarde, utilizando o porômetro de folhas METER SC-1, com um intervalo de 2 horas entre cada leitura. Foram selecionadas quatro plantas da área útil de cada parcela, onde a pinça foi colocada na lâmina foliar da terceira folha completamente expandida, contando a partir do ápice até a base da planta, assim lendo a condutância em 30 segundos (Al - Salman et al., 2023).

2.9 Bioquímica

2.9.1 Atividade das enzimas antioxidantes: Catalase (CAT), Ascorbato peroxidase (APX) e superóxido dismutase (SOD)

Para as análises enzimáticas, foram coletadas amostras de folhas sadias no campo, sendo acondicionadas em recipientes previamente identificados contendo nitrogênio líquido afim de manter a integridade do material. Para a obtenção do extrato enzimático bruto, foram homogeneizadas em nitrogênio líquido, 100 mg de folhas frescas, com 2 ml de tampão de extração composto por fosfato de potássio monobásico e dibásico, ambos a 1M (pH 7,5) e 20 % de polivinilpolipirrolidona (PVPP). O homogeneizado foi centrifugado a 12.000 rpm a uma temperatura de -4 °C durante 15 minutos (ZERAİK et al. 2008). O sobrenadante foi armazenado em um ultrafreezer a -80 °C para posterior determinação das atividades enzimáticas. A atividade da CAT foi determinada pela metodologia

descrita por Havir & Michale (1987) e Anderson et al., (1995); a APX por Nakano & Asada (1981) e a SOD por Gianngiopolitis & Reis (1977) e Beauchamp & Fridovich (1971).

2.10 Design experimental

Os tratamentos foram distribuídos em blocos ao acaso, arranjados em esquema fatorial 5x2x3, referentes à cinco doses de nitrogênio (N) (0, 50, 100, 150, 300 kg ha⁻¹) na presença e ausência de molibdênio (Mo) (0, e 160 g ha⁻¹) e três ciclos de produção com quatro repetições (Figura 2.1).

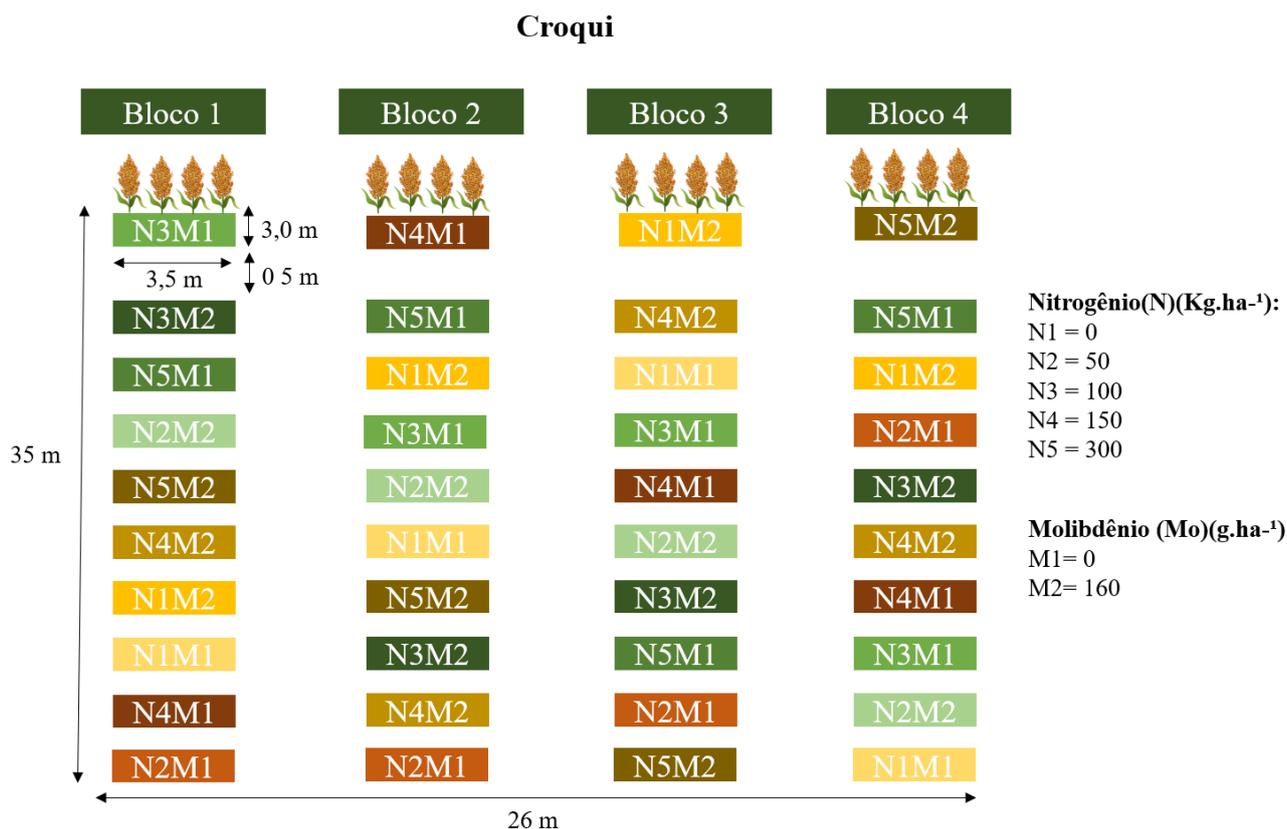


Figura 2.1. Croqui da área experimental, Serra Talhada-PE.

2.11 Estatística

Os dados foram testados quanto à normalidade e homogeneidade das variâncias, usando os testes de Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente. Em seguida, foram submetidos às análises de variância pelo teste F ($p \leq 0,05$). Quando as variáveis foram significativas nos fatores ciclo, aplicação de molibdênio e a interação com esses fatores, foi aplicado o teste de média Tukey a 5% de probabilidade, enquanto para as doses de nitrogênio foi aplicado à análise de regressão. Além disso, os dados ainda foram submetidos a análise de componentes principais (PCA). Todas as análises de dados e gráficos foram realizadas utilizando os softwares estatístico R Studio versão 4.3.0 e o SigmaPlot 15.0, respectivamente.

3. RESULTADOS

4. 3.1 Variáveis biométricas

Nos tratamentos com as doses de nitrogênio, quando comparado com o controle, a AP aumentou significativamente ($p \geq 0,05$) em 59% ($p=0,00$, Figura 3) na dosagem 235,43 kg ha⁻¹ de N. Entre os ciclos, a maior AP (228,5 cm) ocorreu na rebrota 1 ($p=0,00$, Tabela 2). O efeito da interação ciclo x N foi significativo ($p=0,00$), obtendo maiores AP na rebrota 1 (281,87 cm) e rebrota 2 (285,21,0 cm) na dose 300 kg ha⁻¹ N (Tabela 2). As variáveis NFV e LF foram influenciadas apenas pelo fator ciclo (Tabela 2). O NVF obteve maior valor no ciclo rebrota 2, com aumento significativo de 50% e 43,16% ($p=0,004$) em comparação aos ciclos planta e rebrota 1, respectivamente. A maior LF ocorreu no ciclo rebrota 1, com acréscimos significativos de 51,21% e 46,52% ($p=0,003$) em comparação aos ciclos planta e rebrota 2, respectivamente. O CF foi influenciado pelos fatores ciclo e doses de N isoladamente. No fator ciclo, o CF obteve acréscimos significativos de 18,42% e 6,97% ($p=0,001$ Tabela 2) sobre os ciclos planta e rebrota 1, respectivamente. No fator doses de N, o CF aumentou em função das maiores doses de N ($p=0,00$ Figura 3).

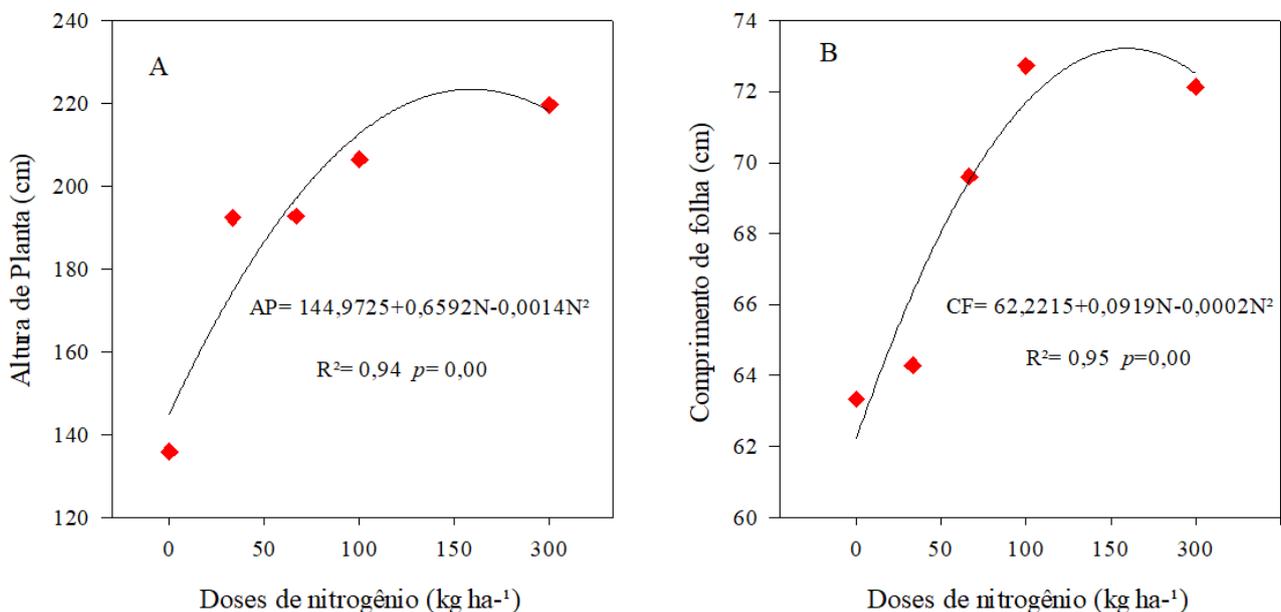


Figura 3. Altura de planta (AP) (A) e comprimento de folhas (CF)(B) em ciclos consecutivos do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio e molibdênio no semiárido brasileiro.

Tabela 2. Valores médios de crescimento em ciclos consecutivos do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio e molibdênio.

Ciclo	AP (cm)	CF (cm)	LF (cm)	NFV
Planta	120,7C	62,0C	5,6C	4,5C
Rebrota 1	228,5A	70,7A	11,5A	5,2B
Rebrota 2	219,1B	76,7A	6,1B	9,1A
CV (%)	20,3	10,3	25,0	12,3
Valor de <i>p</i>	0,0010	0,0041	0,0004	0,0001

Ciclo	Doses de N	AP (cm) ⁽¹⁾
Planta	0	109,04iC
Planta	50	113,92hC
Planta	100	118,79hB
Planta	150	123,65gB
Planta	300	137,54fB
Rebrota 1	0	192,95dA
Rebrota 1	50	207,77cA
Rebrota 1	100	222,59bcA
Rebrota 1	150	237,41bA
Rebrota 1	300	281,87aA
Rebrota 2	0	175,05eB
Rebrota 2	50	193,40dB
Rebrota 2	100	211,77cAB
Rebrota 2	150	230,13bA
Rebrota 2	300	285,21aA
CV (%)	-	20,3
Valor de <i>p</i>	-	0,0010

AP- Altura de Planta; CF- Comprimento da Folha; LF-Largura de Folha; NFV- Números de Folhas Vivas. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Letras minúsculas se referem as doses de N e maiúscula aos ciclos.

⁽¹⁾ Doses N x Planta = $109,0482 + 0,0975 * N$ $R^2 = 0,74$ $p = 0,00$

⁽¹⁾ Dose de N x Rebrota 1 = $192,9528 + 0,2964 * N$ $R^2 = 0,90$ $p = 0,00$

⁽¹⁾ Doses de N x Rebrota 2 = $175,0590 + 0,3672 * N$ $R^2 = 0,84$ $p = 0,00$

3.2 Produtividade

A maior produtividade de MV, MS, EUA e a EUN ocorreram no ciclo rebrota 2, com o aumento significativo de 27,9% e 5,1% ($p=0,00$) para MV, 58,42% e 43,97% ($p=0,00$) para a MS e 53,57%, 34,16% para EUN ($p=0,00$) e 33,34% e 20,83% ($p=0,00$), em comparação ao ciclo planta e rebrota 1, respectivamente (Tabela 3). A EUN ainda foi influenciada pelo fator isolado de molibdênio com aumento significativo de 18,18% na presença do Mo (160 g ha^{-1}), na interação ciclo x Mo com maior valor ($0,28\text{ kg}^2/\text{g}$) no ciclo rebrota 1 e presença de Mo e na interação ciclo x N, com resposta linear no aumento das doses de N no solo. Todas essas variáveis obtiveram efeito isolado das doses de N, resultando em maiores produtividades de MV ($47,98\text{ Mg ha}^{-1}$), MS ($19,66\text{ Mg ha}^{-1}$), EUA ($5,57\text{ kg/m}^3$) e EUN ($0,2604\text{ kg}^2/\text{g}$), na maior dosagem de N ($300\text{ kg ha}^{-1}\text{ N}$) (Figura 4).

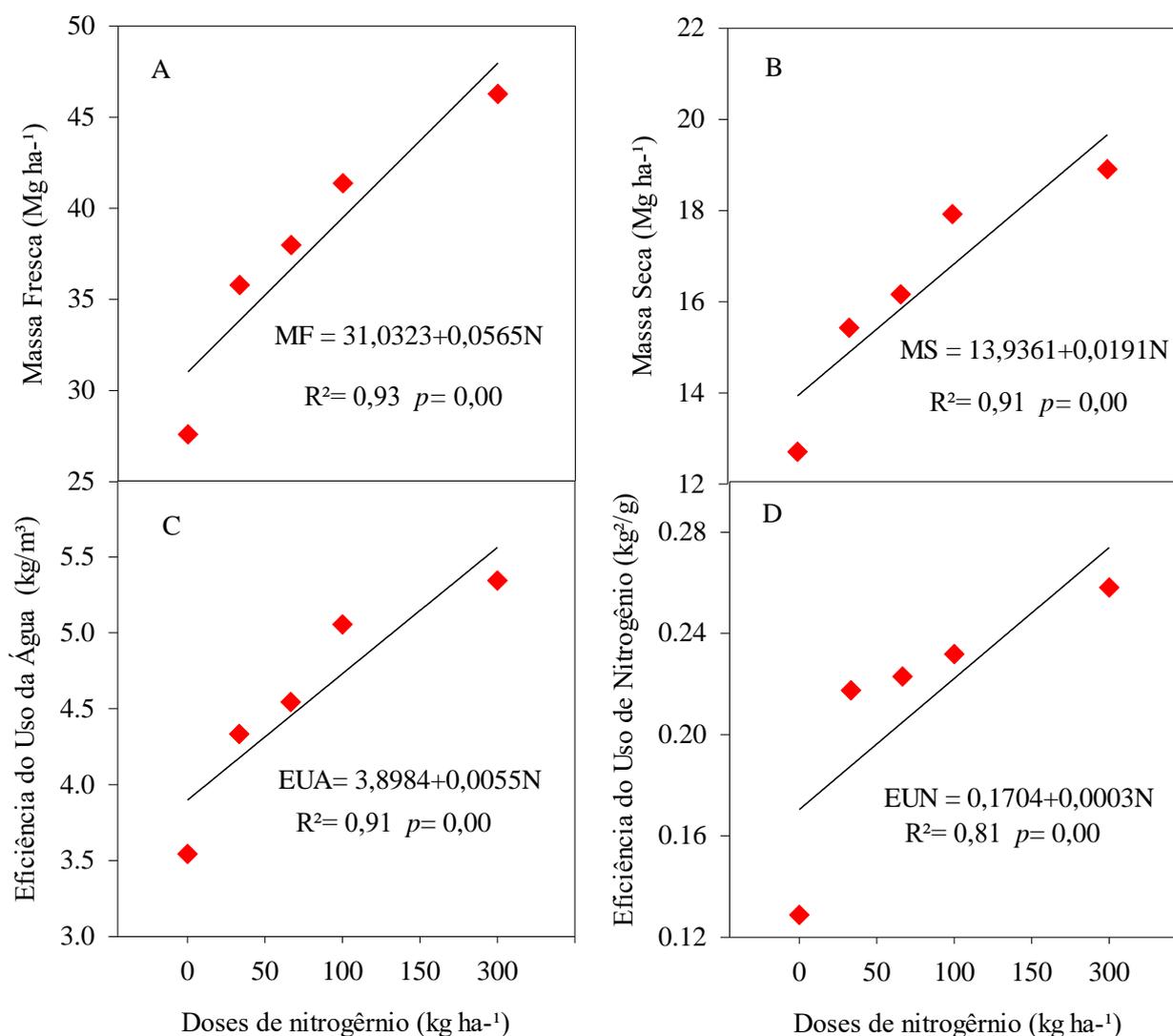


Figura 4. Massa verde (MV) (A), massa seca (MS)(B) e eficiência do uso da água (EUA)(C) e eficiência do uso de nitrogênio (EUN) (D) em ciclos consecutivos do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio e molibdênio.

Tabela 3. Valores médios de produtividade em ciclos consecutivos do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio e molibdênio. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Letras minúsculas se referem as doses de N e Mo e maiúscula aos ciclos.

Ciclo	MS	MV	EUA	EUN
Planta	10,241C	30,65C	2,99C	0,16C
Rebrota1	13,805B	40,29B	4,24B	0,19bB
Rebrota2	24,63A	42,47A	6,44A	0,24A
CV (%)	21,8	15,8	10,1	14,5
Valor de p	0,001	0,001	0,0001	0,002
Doses de Mo			EUN	
0			0,18b	
160			0,22a	
CV (%)			10,9	
Valor de p			0,0001	
Ciclo	Doses de Mo	EUN		
Planta	0			0,16cB
Planta	160			0,21bB
Rebrota1	0			0,20bA
Rebrota1	160			0,28aA
Rebrota2	0			0,17cB
Rebrota2	160			0,19bcC
CV (%)				10,2
Valor de p				0,001
Ciclo	Doses de N	EUN ⁽¹⁾		
Planta	0			0,16dA
Planta	50			0,18cB
Planta	100			0,21bB
Planta	150			0,18cB
Planta	300			0,22bB
Rebrota1	0			0,11dB
Rebrota1	50			0,23bA
Rebrota1	100			0,30aA
Rebrota1	150			0,28abA
Rebrota1	300			0,30aA
Rebrota2	0			0,10dB
Rebrota2	50			0,17cdB
Rebrota2	100			0,18cC
Rebrota2	150			0,19cB
Rebrota2	300			0,19cC
CV (%)	-			14,2
Valor de p	-			0,0001

MV- Massa Verde; MS- Massa Seca; EUA-Eficiência no Uso da Água; EUN-Eficiência na utilização de nitrogênio.

⁽¹⁾ Doses de N x Planta = $0,1623+0,0002N$ $R^2= 0,97$ $p= 0,00$

⁽¹⁾ Doses de N x Rebrota 1 = $0,1815+0,0005N$ $R^2= 0,80$ $p=0,00$

⁽¹⁾ Doses de N x Rebrota 2= $0,1451+0,0002N$ $R^2=0,80$ $p=0,00$

3.3 Avaliação nutricional

3.3.1 Teor de nitrogênio total (Nt), molibdênio (Mo), cloreto (Cl) e potássio (K)

No fator ciclo, o maior teor de N total ($8,3 \text{ g kg}^{-1}$) ocorreu no ciclo planta, havendo uma redução significativa de 13,73% e 20,84% na rebrota 1 e 2, respectivamente ($p=0,00$, Tabela 4). No fator doses de nitrogênio, na dosagem de 300 kg ha^{-1} N, o N total teve um aumento significativo de 17,72% ($p=0,00$, Figura 5) quando comparado ao tratamento controle. O efeito da interação ciclo e doses de N foi significativo ($p=0,00$), obtendo maior teor de N total ($10,18 \text{ g kg}^{-1}$) no ciclo planta e dose 300 kg ha^{-1} de N (Tabela 4).

O teor de Mo foi influenciado pelas doses de nitrogênio, ocorrendo uma redução significativa à medida em que se elevou as doses de N ($p=0,01$, Figura 4). Por outro lado, houve um aumento significativo de 84% desse elemento (Mo) ($p=0,001$, Tabela 4) em relação ao tratamento controle.

O maior teor de Cl nas plantas ocorreu no ciclo planta, com aumento significativo de 10,72% ($p=0,01$, Tabela 4) em relação aos ciclos rebrota 1 e rebrota 2. Nas dosagens de N, o teor de Cl foi aumentando conforme aumentava as doses de N ($p=0,00$, Figura 5), além disso, na interação ciclo e doses de N, o teor de Cl foi significativo obtendo o maior valor ($0,070 \text{ g kg}^{-1}$) no ciclo planta e na dose 300 kg ha^{-1} de N ($p=0,01$, Tabela 4). Não houve efeito significativo em nenhum dos fatores estudados para o teor de K ($p=0,2$).

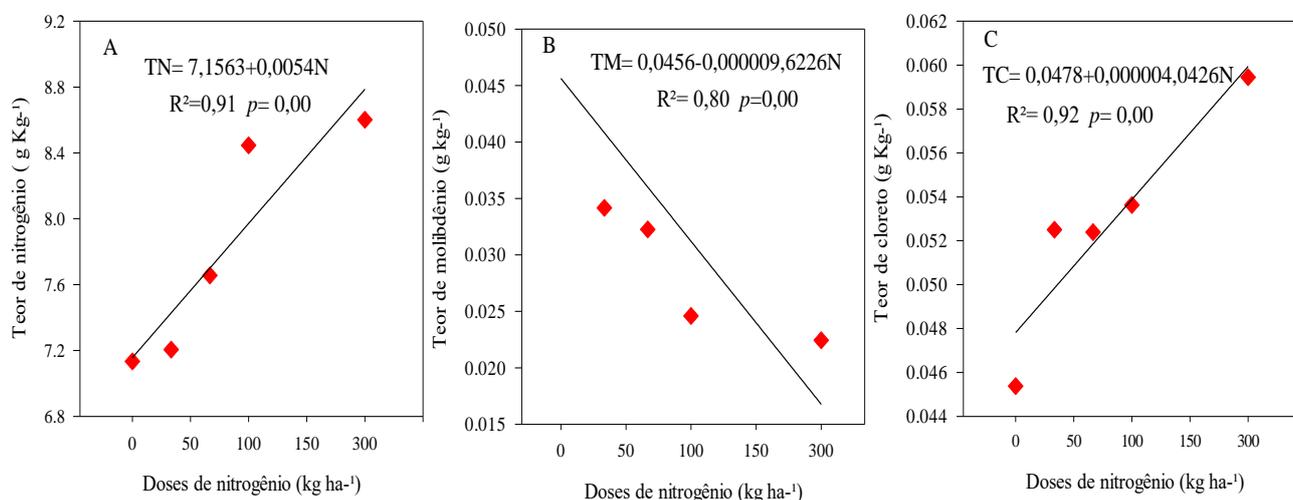


Figura 5: Teor de nitrogênio total (NT), molibdênio (Mo) e cloreto (Cl) em ciclos consecutivos do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio e molibdênio.

Tabela 4. Teor de nutrientes em ciclos consecutivos do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio e molibdênio.

Doses de Mo		Mo (g kg ⁻¹)	
0		0,00093b	
160		0,0058a	
CV (%)		10,1	
Valor de p		0,001	
Ciclo	N total (g kg ⁻¹)		Cl (g kg ⁻¹)
Planta	8,30A		0,056A
Rebrota1	7,16B		0,050B
Rebrota2	6,57B		0,050B
CV (%)	21,1		20,2
Valor de p	0,0001		0,014
Ciclo	Doses de N	N total (g kg ⁻¹) ⁽¹⁾	Cl (g kg ⁻¹) ⁽²⁾
Planta	0	7,56cB	0,044bB
Planta	50	8,22bcA	0,057abA
Planta	100	7,0cA	0,056abA
Planta	150	9,92abA	0,058abA
Planta	300	10,18aA	0,070aA
Rebrota1	0	5,69eC	0,042bB
Rebrota1	50	6,35deB	0,050bB
Rebrota1	100	7,22cA	0,050bB
Rebrota1	150	8,75bB	0,056abA
Rebrota1	300	8,78bB	0,055abB
Rebrota2	0	8,15bcA	0,050abA
Rebrota2	50	6,73dC	0,054abAB
Rebrota2	100	5,74eB	0,052abB
Rebrota2	150	6,66dC	0,043bB
Rebrota2	300	6,66dC	0,054abB
CV (%)	-	20,00	12,04
Valor de p	-	0,0010	0,0140

N total- Nitrogênio Total (kg ha⁻¹), Cl- Cloreto (g ka⁻¹) e Mo- Molibdênio (g ka⁻¹). As médias que não compartilham as letras comuns em cada coluna diferem significativamente em $p \leq 0,05$ com base no teste de Tukey. Letras minúsculas se referem as doses de N e Mo e maiúscula aos ciclos.

⁽¹⁾ Doses de N x Planta = $7,4272 + 0,0096N$ $R^2 = 0,80$ $p = 0,00$

⁽¹⁾ Doses de N x Rebrota 1 = $6,0709 + 0,0107N$ $R^2 = 0,89$ $p = 0,00$

⁽¹⁾ Doses de N x Rebrota 2 = $7,1615 - 0,0031N$ $R^2 = 0,41$ $p = 0,00$

⁽²⁾ Doses de N x Planta = $0,0478 + 0,0000075320N$ $R^2 = 0,94$ $p = 0,00$

⁽²⁾ Doses de N x Rebrota 1 = $0,0453 + 0,0000042335N$ $R^2 = 0,86$ $p = 0,00$

⁽²⁾ Doses de N x Rebrota 2 = $0,0471 + 0,0000030012N$ $R^2 = 0,80$ $p = 0,00$

3.4 Extração de nitrogênio total (Nt), molibdênio (Mo), cloreto (Cl) e potássio (K)

Na rebrota 2, a extração de N total, Cl e K aumentou significativamente em 47,56% e 38%; 50,83% e 43,54%; 62,89% e 50,90% em relação aos ciclos planta e rebrota 1, respectivamente (Tabela 5). Esse comportamento se repete no fator, doses de N, onde o maior valor de extração de N total (160,62 Kg ha⁻¹), Cl (1,10 kg ha⁻¹) e K (73,30 Kg ha⁻¹) ocorreram na maior dose de N (300 kg ha⁻¹) (Figura 6).

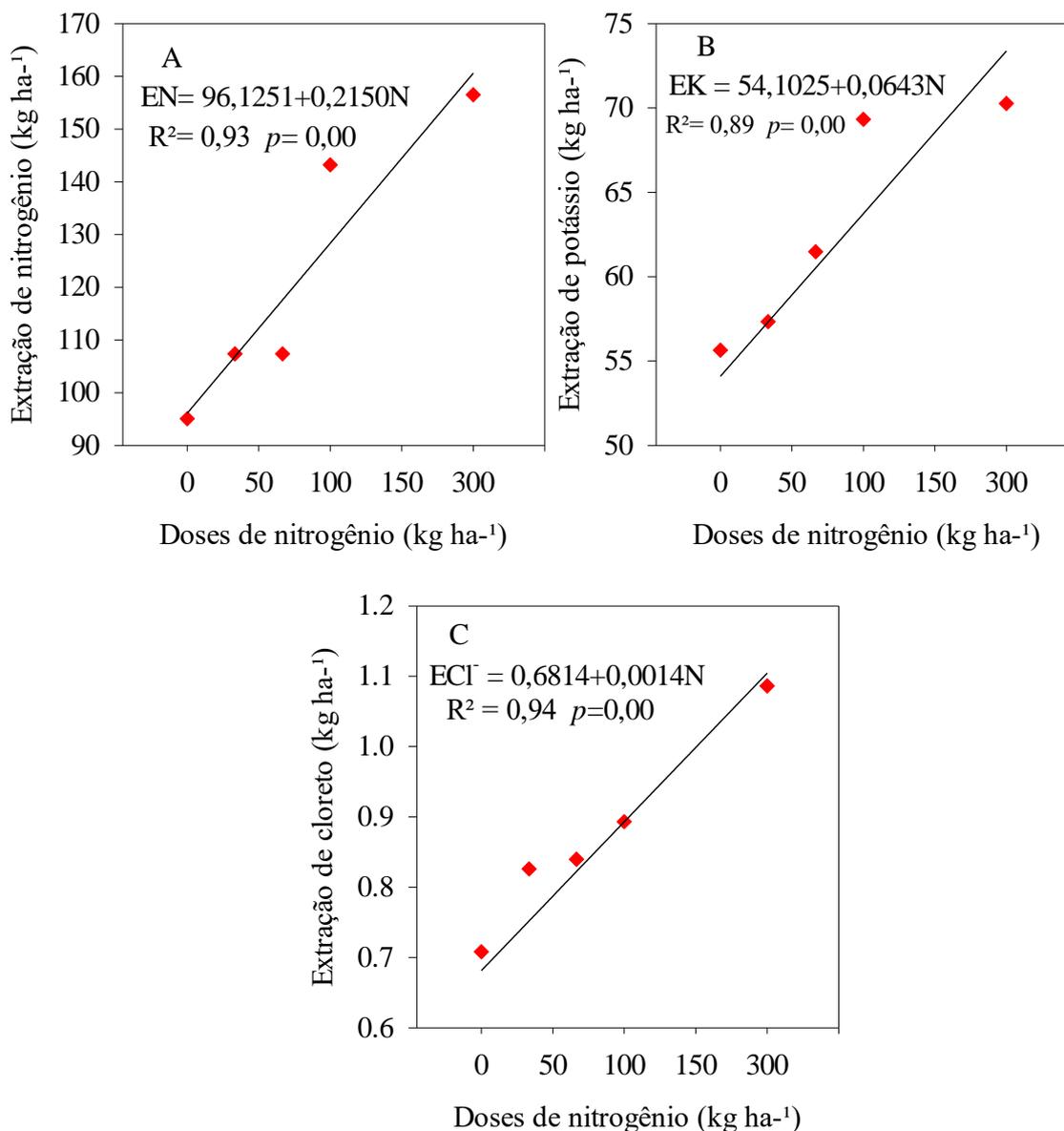


Figura 6: Extração de nitrogênio total (Nt), molibdênio (Mo) e cloreto (Cl) em ciclos consecutivos do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio e molibdênio.

A extração de N total ainda sofreu influência da interação ciclo x N, resultando no maior valor de extração de cerca de 185,48 kg ha⁻¹, no ciclo rebrota 2 e dosagem 300 kg ha⁻¹ de N ($p = 0,00$,

Tabela 5). A extração de Mo, foi significativo apenas no fator doses de Mo, com aumento de 84,78% da extração na maior dose de Mo (160 g ha⁻¹) em relação ao controle (p=0,0001, Tabela 5).

Tabela 5. Extração de nutrientes em ciclos consecutivos do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio e molibdênio.

Doses de Mo	Mo (kg ha ⁻¹)		
0	0,014b		
160	0,092a		
CV (%)	26		
Valor de p	0,0001		
Ciclo	K (kg ha ⁻¹)	Cl (kg ha ⁻¹)	N total (kg ha ⁻¹)
Planta	36,95C	0,59C	89,54C
Rebrota1	48,88B	0,70B	105,76B
Rebrota2	99,57A	1,24A	168,10A
CV (%)	22,1	28,40	20,2
Valor de p	0,002	0,001	0,001
Ciclo	Doses de N	N total (kg ha ⁻¹) ⁽¹⁾	
Planta	0	61,64dB	
Planta	50	81,76cdB	
Planta	100	70,01dC	
Planta	150	112,12cC	
Planta	300	122,19cC	
Rebrota1	0	49,34eC	
Rebrota1	50	80,54cdB	
Rebrota1	100	98,40cdB	
Rebrota1	150	141,65cB	
Rebrota1	300	158,85bcB	
Rebrota2	0	174,26abA	
Rebrota2	50	159,86bcA	
Rebrota2	100	142,04bcA	
Rebrota2	150	175,86abA	
Rebrota2	300	185,48aA	
CV (%)	-	19,30	
Valor de p	-	0,0010	

N total- Nitrogênio Total (kg ha⁻¹), Cl- Cloreto (g ka⁻¹) e Mo- Molibdênio (g ka⁻¹). As médias que não compartilham as letras comuns em cada coluna diferem significativamente em p≤0,05 com base no teste de Tukey. Letras minúsculas se referem as doses de N e Mo e maiúscula aos ciclos.

⁽¹⁾ Doses de N x Planta = 63,6840+0,2155N R²= 0,94 p=0,00

⁽¹⁾ Doses de N x Rebrota 1 = 62,0287+0,3645N R²= 0,93 p=0,00

⁽¹⁾ Doses de N x Rebrota 2= 156,5344+0,0964N R²= 0,63 p=0,00

3.5 Resposta fisiológica

3.5.1 Condutância estomática (gs)

No fator ciclo, a maior *gs* ocorreu no ciclo planta, em todos os horários das leituras, 08:00 (398,2 mmol m⁻² s⁻¹), 10:00 (377,1 mmol m⁻² s⁻¹), 12:00 (324,4 mmol m⁻² s⁻¹) e 14:00 (242,5 mmol m⁻² s⁻¹) horas (Tabela 6). Houve resposta linear para essa variável na interação N x Mo ($p > 0,05$) para a leitura das 08:00 horas da manhã ($p = 0,00$), resultando no maior valor (321,6 mmol m⁻² s⁻¹) na interação 300 kg ha⁻¹ N e 160 g ha⁻¹ Mo.

Tabela 6. Condutância estomática (gs) em ciclos consecutivos do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio e molibdênio.

gs (mmol m ⁻² s ⁻¹)				
Ciclo	8:00	10:00	12:00	14:00
Planta	398,2A	377,1A	324,4A	242,5A
Rebrota 1	231,3B	258,9B	206,5B	170,0B
Rebrota 2	156,9C	182,0C	195,0C	190,3C
CV (%)	34,1	34,1	31,3	39,6
Valor de p	0,0010	0,0001	0,00010	0,0010
Doses de N	Doses de Mo	08:00 gs (mmol m ⁻² s ⁻¹) ⁽¹⁾		
0	0	206.41d		
50	0	248.30c		
100	0	245.12c		
150	0	267.3bc		
300	0	303.03ab		
0	160	232.88c		
50	160	262.4bc		
100	160	260.47bc		
150	160	275.12b		
300	160	321.6a		
CV (%)	-	14,4		
Valor de p	-	0,0001		

As médias que não compartilham as letras comuns em cada coluna diferem significativamente em $p \leq 0,05$ com base no teste de Tukey. Letras minúsculas se referem as doses de N e Mo e maiúscula aos ciclos.

⁽¹⁾N x Mo (0) = 218,9176+0,2927N R²= 0,95 p= 0,00

$${}^{(1)}N \times Mo (160) = 237,5994 + 0,2725N \quad R^2 = 0,97 \quad p = 0,00$$

3.6 Resposta bioquímica

3.6.1 Atividade enzimática: Catalase (CAT), Ascorbato peroxidase (APX), Peroxidase dismutase (SOD)

A atividade da SOD não foi significativa para nenhum dos fatores estudados. A atividade da CAT foi influenciada pelas doses de N e Mo de forma isolada, aumentando significativamente em 89,8% ($p = 0,03$, Figura 7) na dose 100 kg ha^{-1} N em relação ao tratamento controle e 5% ($p = 0,0001$, Tabela 7) em comparação com a maior dose de Mo (160 g ha^{-1}); e na interação N x Mo ($p > 0,05$), com maior atividade ($598,66 \text{ nmol H}_2\text{O}_2 \text{ g}^{-1} \text{ MS min}^{-1}$) dessa enzima na dosagem de 300 kg ha^{-1} de N e 160 g ha^{-1} de Mo (Tabela 7). A atividade da APX foi significativa no fator doses de N, com maior atividade ($8,24 \text{ nmol H}_2\text{O}_2 \text{ g}^{-1} \text{ MS min}^{-1}$) na maior dose de N (300 kg ha^{-1}) e na interação Ciclo x Mo ($p > 0,05$), com maior atividade ($10,7 \text{ nmol g MF}^{-1} \text{ min}^{-1}$) no ciclo rebrota 2 e 160 g ha^{-1} de Mo.

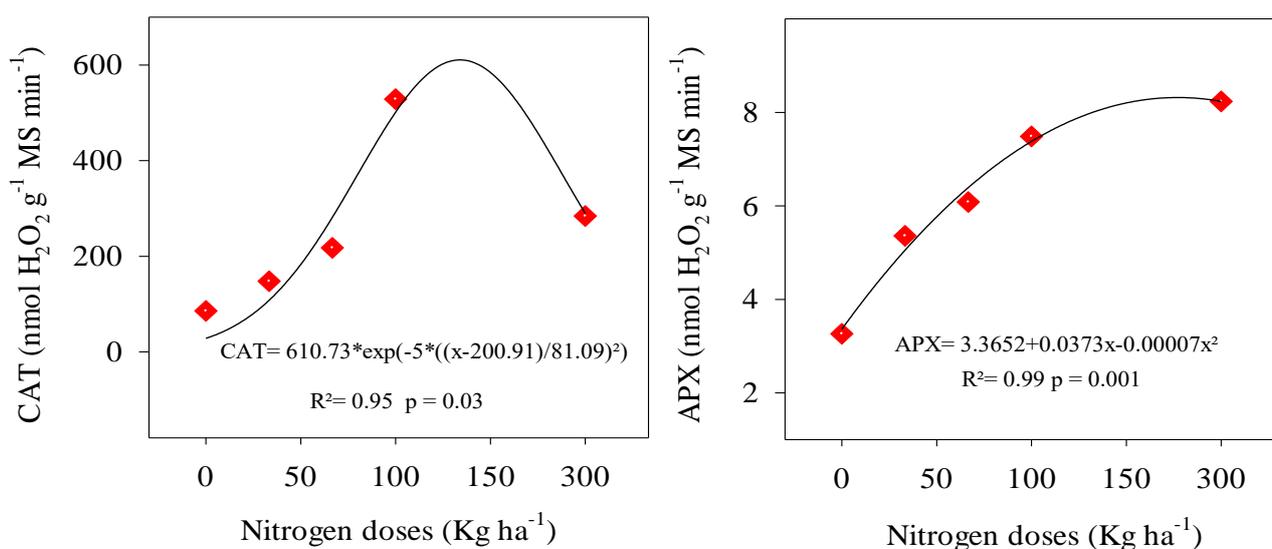


Figura 7. Atividade enzimática da catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX) em ciclos consecutivos do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio e molibdênio

Tabela 7. Atividade enzimática da catalase (CAT) em ciclos consecutivos do sorgo forrageiro submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio e molibdênio.

Doses de Mo		CAT (nmol H ₂ O ₂ g ⁻¹ MS min ⁻¹)
0		259a
160		246b
CV (%)		12,6
Valor de p		0,0001

Doses de N	Doses de Mo	CAT (nmol H ₂ O ₂ g ⁻¹ MS min ⁻¹) ⁽¹⁾
0	0	88,20g
50	0	159,38e
100	0	230,54d
150	0	301,72bc
300	0	515,25,18b
0	160	101,8f
50	160	184,63f
100	160	267,44,37d
150	160	350,24c
300	160	598,66a
CV (%)	-	12,60
Valor de p	-	0,002

Ciclo	Doses de Mo	APX (nmol H ₂ O ₂ g ⁻¹ MS min ⁻¹)
Rebrota 1	0	7,35cA
Rebrota 1	160	9,37bB
Rebrota 2	0	7,30cA
Rebrota 2	160	10,7aA
CV (%)	-	10,4
Valor de p	-	0,0001

As médias que não compartilham as letras comuns em cada coluna diferem significativamente em $p \leq 0,05$ com base no teste de Tukey. Letras minúsculas se referem as doses de N e Mo e maiúscula aos ciclos.

$$^{(1)} N \times Mo (0) = 88,1991 + 1,4235N \quad R^2 = 0,95 \quad p = 0,03$$

$$^{(1)} N \times Mo (160) = 101,8328 + 1,6561N \quad R^2 = 0,98 \quad p = 0,00$$

3.7 Correlação entre as variáveis analisadas e o manejo da fertilização com nitrogênio e molibdênio

Os resultados obtidos por meio da PCA (Análise de Componentes Principais) proporcionam uma visão abrangente da estrutura subjacente dos dados de produtividade de sorgo forrageiro sob déficit hídrico, destacando a inter-relação entre as variáveis analisadas e o manejo da fertilização com nitrogênio e molibdênio. A interpretação desses resultados não apenas identifica a variabilidade presente nos dados (totalizando 69,72%), mas também lança luz sobre os fatores fundamentais que impulsionam a produtividade e o desempenho desta cultura em ambientes deficitários.

Os autovetores teor de nitrogênio (TN), potássio (TK) e cloreto (TC), extração de cloreto (ECI) e potássio (EK), área foliar (AF), EUA, CAT, AP, MS e NFV se alinham no PC1 na mesma direção, indicando uma correlação positiva entre essas variáveis, ao contrário de gs, que se alinha na direção oposta (Fig. 8A). O ciclo da planta e a ausência de Mo, juntamente com as doses de N, mostraram uma relação negativa, onde o rebroto 2, doses mais elevadas de N (100, 150 e 300 kg ha⁻¹ de N), e a presença de Mo foram mais críticos no aumento dessas variáveis. As variáveis APX, EUN, extração de Mo (EMo) e N (EM) e teor de Mo (TMo) se alinham na mesma direção, mas no PC2. Essas variáveis apresentaram uma relação positiva com os tratamentos do ciclo da planta, presença de Mo e doses de 100, 150 e 300 kg ha⁻¹ de N, resultando em valores aumentados.

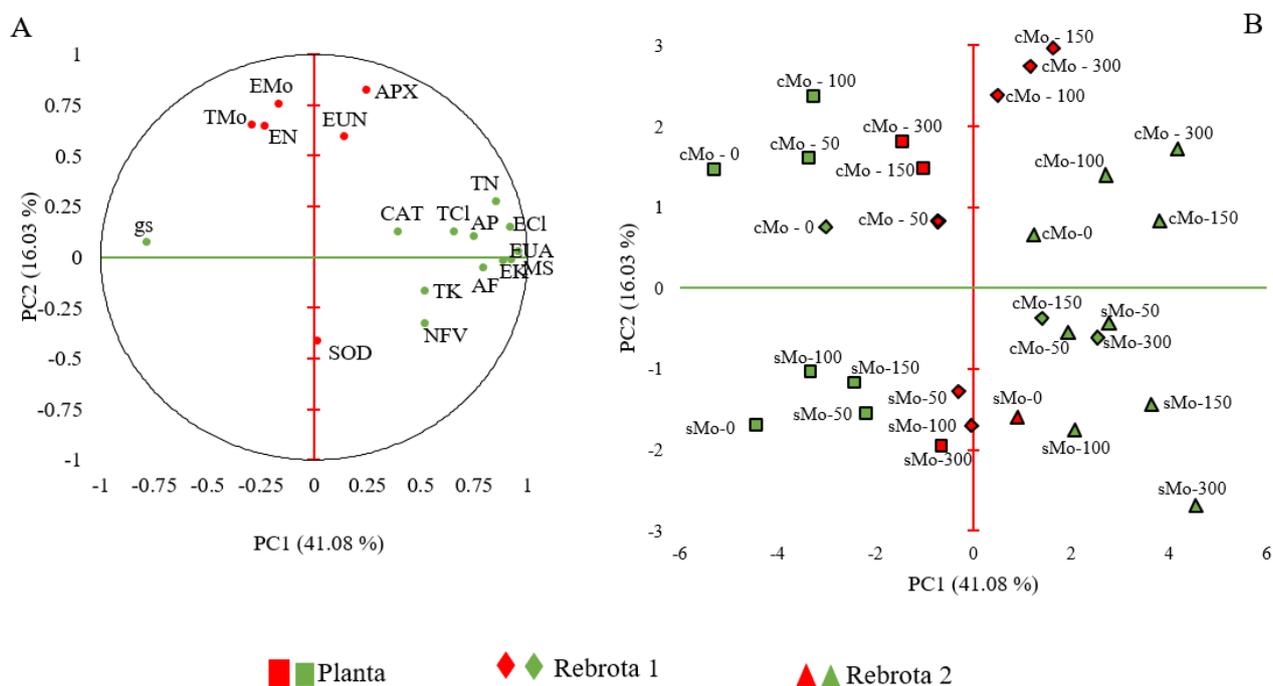


Figura 8. Representação gráfica da relação entre as variáveis (A), crescimento (AP, AF e NFV), produtividade (MS, EUN e EUA), avaliação nutricional (teor e extração de N total, Mo, Cl- e K), condutância estomática (gs) e atividade das enzimas antioxidantes (CAT, APX e SOD) do sorgo forrageiro submetido a deficit hidrico e o manejo da adubação nitrogenada (0; 50; 100; 150 e 300 kg

ha⁻¹) e molibdica (0 e 160 g ha⁻¹) (B). Os símbolos verdes representam as variáveis e o manejo no CP1, enquanto os vermelhos as variáveis e o manejo no CP2.

Os benefícios promovidos pelas condições meteorológicas do ciclo rebrotam 1 e 2, juntamente com o manejo da adubação molibdica e nitrogenada afetaram positivamente as variáveis de produção, ocorrendo aumento dos autovetores MS, EUN e EUA nos tratamentos com a presença do Mo e na dose 300 kg ha⁻¹ de N, denotando a importância do período de cultivo e do manejo nutricional com o N e o Mo de forma sinérgica. A gs mostrou-se inversamente proporcional a AF indicando que à medida que ocorre o aumento da AF, a gs diminui ou vice-versa. A maior atividade das enzimas APX e CAT, embora localizadas nos componentes distintos, se encontravam no mesmo quadrante indicando que ambas as atividades sofreram influência das condições do ciclo rebrota 1 e 2 e dos maiores níveis da adubação nitrogenada juntamente com a presença do Mo. Esse comportamento é de suma importância para o sorgo sob déficit hídrico, visto que a atividades dessas enzimas antioxidantes promovem maior tolerância a cultura nessas condições. É visto ainda que a APX obteve uma relação positiva com o EUN, EN, teor e extração de Mo, destacando a importância da nutrição mineral do sorgo em ambientes adversos.

O teor e extração de Mo obtiveram maior relação positiva com a extração de N, o que indica a importância desse micronutriente na presença do N, afetando na assimilação do N pelo sorgo, principalmente em condições de déficit hídrico. Quanto os teores de Cl, K, N e a extração de K e Cl mostraram relação positiva entre si e com as AP, MS, NFV e EUA, apontando que o aumento nos teores e extração desses nutrientes beneficiam nessas variáveis.

5. DISCUSSÃO

O déficit hídrico é um dos fatores abióticos significativos que interfere no crescimento e desenvolvimento das culturas em muitas partes do mundo, particularmente em regiões áridas e semiáridas. Portanto, a utilização de cultivares tolerantes e mecanismos de tolerância a esse estresse, bem como implementar práticas de manejo como o manejo de fertilizantes, é crucial para mitigar e minimizar os efeitos adversos do déficit hídrico nas culturas. Os efeitos da suplementação nutricional com nitrogênio e molibdênio nos incrementos produtivos das culturas foram amplamente relatados (ROSADO et al., 2021; NASAR et al., 2022; LI et al., 2023, NETO et al., 2023). No entanto, a forma como estes nutrientes afetam na produtividade de ciclos consecutivos do sorgo forrageiro em ambientes de déficit hídrico é pouco compreendida.

4.1 Doses de nitrogênio e ciclos consecutivos influenciam nas variáveis biométricas do sorgo forrageiro sob déficit hídrico

Neste estudo, todas as variáveis biométricas foram afetadas significativamente pelos ciclos ocorrendo o maior AP, CF, LF na rebrota 1 e NFV na rebrota 2. Os maiores valores das variáveis AP, CF, LF no segundo ciclo (rebrota 1) e NFV no terceiro ciclo (rebrota 2), provavelmente se deram ao aumento na precipitação nesses períodos (Figura 1), além de uma maior diluição dos sais e remoção dos mesmos nas zonas radiculares das plantas.

Embora o sorgo seja moderadamente tolerante as condições de déficit hídrico, a longa exposição a essa condição pode ocasionar redução no transporte de elétrons, afetando a síntese de ATP e NADPH, e na eficiência carboxilativa comprometendo o seu crescimento e rendimento produtivo (ARAÚJO et al., 2019 e PEROTTI et al., 2021). Missio e colaboradores (2023) obtiveram resultados semelhantes aos achados nesse trabalho, onde observaram que a altura de plantas, número de perfilhamento, comprimento e largura de folha, foram influenciadas pelo período de semeio do milho e capim Sudão em dois anos de estudo, obtendo maiores valores nos períodos de maior precipitação e elevadas temperaturas.

A altura máxima das plantas (228,5 cm) e do comprimento de folhas (76,7 cm) foram obtidas na dosagem 235,43 kg ha⁻¹ de N e 229,75 kg ha⁻¹ de N, respectivamente. O incremento dessas variáveis com o aumento na dose de N indica que o sorgo usou esse nutriente durante a divisão celular ativa para formar blocos de construção (proteínas) para o alongamento celular. Pesquisas anteriores também relataram aumento na AP (KAPLAN et al., 2019) e CF (HORSCHUTZ et al., 2023) nos níveis mais elevados de nitrogênio, corroborando assim com os resultados encontrados nesse estudo.

Além disso, a AP ainda foi influenciada na interação ciclo x N, obtendo maior valor (285,21 cm) na rebrota 2 e dose 300 kg ha⁻¹ de N, com acréscimo de 23,13,40% e 17,44% em comparação a esses fatores isolados, respectivamente. Provavelmente isso ocorreu em função de uma maior disponibilidade hídrica nesse período (Figura 1), culminando numa maior dissolução da ureia e maior aproveitamento pela planta afetando essa variável (JIANG et al., 2020).

4.2 Doses de nitrogênio e ciclos consecutivos do sorgo forrageiro proporcionaram incrementos na produção de MS, MV, EUA e EUN sob déficit hídrico

As maiores produtividade de MV, MS, EUA e EUN na rebrota 2, podem estar relacionadas a fatores edafoclimáticos como a precipitação e maiores temperaturas que ocorreu nesse período (Figura 1) e a maior disponibilidade de nutrientes não absorvidos pelas plantas inicialmente. A temperatura influencia diretamente no crescimento das plantas, afetando seu metabolismo, taxa de fotossíntese e respiração. Vale ressaltar ainda que as produções de MS e MV também estão relacionadas ao processo de fotossíntese, ou seja, maior fotossíntese, maior produção de biomassa.

O sorgo tem uma faixa específica de temperatura média variando entre 24 °C e 27 °C na qual seu crescimento é otimizado (MUNDIA et al., 2019). Temperaturas muito baixas ou muito altas podem inibir seu desenvolvimento e reduzir a produção de biomassa. Sendo uma planta de metabolismo C4, o sorgo mantém sua taxa fotossintética em ambientes de altas temperaturas (FARHADI et al., 2022), mas quando exposto a um longo período de déficit hídrico, o seu rendimento forrageiro pode ser reduzido (ELHAG et al., 2018).

Essas variáveis meteorológicas influenciam diretamente no acúmulo de biomassa do sorgo, uma vez que com a precipitação, ocorre uma maior disponibilidade hídrica e de nutrientes para a planta auxiliando em processos fisiológico e bioquímicos, como fotossíntese e atividade das enzimas responsáveis pelo metabolismo fotossintético, principalmente a rubisco (ARAÚJO et al., 2019), enquanto a temperatura atua diretamente nas reações fotoquímicas nos tilacóides e nas reações de assimilação de carbono no estroma dos cloroplastos, resultando assim em uma maior produção de biomassa (HABERMANN et al., 2019).

Essas descobertas estão de acordo com os resultados encontrados por Farhadi et al. (2022), que indicam que o sorgo obteve maior produtividade no ano de elevadas temperaturas, e com Enciso et al., (2015) que constataram que o sorgo obteve maior produção de biomassa e EUA na maior disponibilidade hídrica.

A adição de doses crescentes de nitrogênio proporcionou maiores incrementos na produção de MV, MS, EUA e EUN para o sorgo sob déficit hídrico. Esses resultados podem ser atribuídos a capacidade osmorreguladora desse nutriente que atua induzindo o acúmulo de composto como prolina, afim de regular o metabolismo da planta melhorando a eficiência no uso da água, aliviando assim os danos ocasionado pelo déficit hídrico, e culminando em uma maior produção de biomassa nessas condições (RU et al., 2023). Estas descobertas estão alinhadas com outros estudos que relataram que - o aumento na taxa de aplicação de nitrogênio proporcionou maior produtividade de biomassa e eficiência do uso da água no sorgo Sudão (SAMIR et al., 2017).

Notadamente, a variável EUN foi influenciada pelas doses de Mo de forma isolada e na interação ciclo x Mo, onde o sorgo demonstrou maior eficiência na presença do Mo (em ambos os fatores) e no ciclo rebrota 1, e na interação ciclo x N, obtendo maiores valores no ciclo rebrota 1 e 2 nas dosagens 100 e 300 Kg ha⁻¹ N, respectivamente.

O molibdênio desempenha um papel essencial na eficiência de utilização de nitrogênio (EUN) pelo sorgo, especialmente em ambientes de déficit hídrico. Embora seja necessário em pequenas quantidades, esse micronutriente é crucial para a absorção e assimilação do nitrogênio pelas plantas, atuando na conversão do nitrato em formas mais utilizáveis de nitrogênio, como amônio e compostos orgânicos nitrogenados (JARECKI *et al.*, 2023) (aumentando essa capacidade em ambientes como maior disponibilidade hídrica, como ocorreu no ciclo rebrota 1), podendo explicar assim o aumento

na EUN pelo sorgo nesse estudo. Essas descobertas corroboram com os resultados encontrados por Mellis *et al.* (2022), que observaram um aumento de 48% na EUN pelas mudas de cana-de-açúcar na presença do Mo.

Em situações de déficit hídrico, a planta enfrenta limitações tanto de água quanto de nutrientes. Uma alta EUN permite que a planta utilize o nitrogênio disponível de forma mais eficiente, otimizando sua capacidade de crescimento com a quantidade limitada de nitrogênio disponível no solo (VERMA *et al.*, 2015). Quando a planta é capaz de usar eficientemente o nitrogênio, ela tende a ser mais resistente ao estresse hídrico em função da capacidade osmorreguladora desse nutriente, resultando em um melhor crescimento, desenvolvimento e produção, mesmo em condições adversas como mostra os resultados encontrado nesse estudo.

Com isso, o aumento da EUN pelo sorgo se deve pela maior oferta de N através da adubação nitrogenada e da maior disponibilidade hídrica nos ciclos rebrota 1 e 2 através da precipitação ocorrida nesses períodos, deixando o N mais disponível na solução do solo. Esse achado está de acordo com os resultados encontrados por Campelo *et al.*, (2019), Khan *et al.*, (2020) e Kubar *et al.*, (2022).

4.3 Teor e extração de nutrientes são influenciados pelas doses de N e ciclos consecutivos do sorgo

A absorção de nutrientes pelas raízes pode ser reduzida em condições de déficit hídrico, comprometendo o teor dos nutrientes na planta. Nesse estudo, o teor de N total foi reduzindo em função dos ciclos consecutivos do sorgo. O tempo de colheita de cada ciclo pode ter sido um dos fatores a influenciar no teor desse nutriente, visto que o ciclo com maior teor foi colhido tardiamente em comparação com os demais, indicando que como a planta permaneceu por mais tempo no campo, houve, conseqüentemente, uma maior absorção de nitrogênio. Estudos mostram que os teores de nutrientes no sorgo podem variar em função de tempo de corte (NEUMANN *et al.*, 2011 e ZIKI *et al.*, 2019). Além disso, à ausência de chuvas neste ciclo também pode ter reduzido a perda de nitrogênio por lixiviação, deixando-o mais presente no solo.

Em contrapartida, os teores de cloreto foi aumentando em cada ciclo, o que nesse caso pode indicar ação antagônica do nitrogênio em relação ao cloreto, que competem pelo mesmo sítio ativo inibindo ou a não absorção desses nutrientes. Pesquisas anteriores relataram que o aumento de N inibiu a absorção de íons como cloreto pela planta (MIRANDA *et al.*, 2016 e MARTINEZ *et al.*, 1989).

Na interação ciclo versus N, foi visto que o maior teor de N total e Cl⁻ ocorreu na interação planta e 300 kg ha⁻¹N, reafirmando que a colheita tardia e a ausência da precipitação nesse ciclo podem ter influenciado no maior acúmulo desses nutrientes na parte aérea da planta, enquanto a maior disponibilidade nas doses de nitrogênio proporcionou maiores teores desses nutrientes. Embora o N

e o Cl^- tenham ação antagonista nas plantas, é possível que o aumento no crescimento do sorgo, proporcionado pela maior disponibilidade de nitrogênio, tenha levado a uma maior absorção de água pela cultura. Isso conseqüentemente resultou na absorção do cloreto presente na água de irrigação, que continha elevadas concentrações desse íon. (Tabela 1).

Esse achado está de acordo com os resultados encontrados por Colla et al., (2011), onde a interação desses nutrientes também culminou no maior teor de cloreto na parte aérea do sorgo, e de Corrado et al., (2020), que avaliando a relação do N e Cl^- no manjeriço, observaram maior absorção do Cl^- em comparação ao N, reforçando assim os achados desse estudo.

O acúmulo excessivo desse nutriente nas raízes dos vegetais podem competir com o nitrato (NO_3^-) pelos mesmos canais, afetando na translocação do NO_3^- para a parte aérea das plantas (CORRADO et al., 2020). Os maiores teores de Mo foram encontrados na presença (160 g ha^{-1}) desse nutriente. A presença desse micronutriente na parte aérea do sorgo sob déficit hídrico pode atribuir maior tolerância. Pesquisas anteriormente relataram que a pulverização com Mo reduziram os danos ocasionados pelo déficit hídrico em plantas de soja (HEIDARZADE et al. 2016) e feijão (HESHMAT et al, 2021) aumentando a absorção e eficiência do N nesses ambientes.

O aumento nos níveis de N culminou em maiores teores de N total e Cl^- . No caso do N total, esse comportamento foi resultado de uma maior disponibilidade desse nutriente para o sorgo, enquanto para o Cl^- , como mencionado anteriormente, com o aumento no crescimento da planta ocorreu também maior absorção de água e dos íons do Cl^- presente nesta. Esses achados corroboram com os resultados encontrados por Wei et al. (2020) e Aziez (2022). Em contrapartida, o aumento nas doses de N, resultou em uma redução nos teores de Mo no sorgo. Possivelmente, o aumento das doses de N culminou em um maior crescimento da cultura, resultando em um efeito de diluição do Mo na planta (Leão et al., 2011 e Rosado et al., 2021).

A extração do N total, Cl e K aumentou ao decorrer dos ciclos. Provavelmente, o aumento na umidade do solo proporcionada pela precipitação (Figura 1) nesses períodos tenha resultado em uma maior disponibilidade desses nutrientes para a planta, facilitando assim sua extração e refletindo diretamente na produtividade citados anteriormente. Existem vários relatos na literatura que mostram que ambientes com maior umidade no solo, facilitam na absorção de nutrientes na planta (VERMA et al., 2015; VENÂNCIO et al., 2017 e BANERJEE et al., 2016) Ainda foram encontrados diferença significativas na interação ciclos x N para a extração de N total, ocorrendo a maior extração no tratamento rebrota 2 e 300 Kg ha^{-1} N. Esses resultados podem ser atribuídos a maior umidade do solo nesse ciclo juntamente com a maior oferta de nitrogênio (SANTOS et al., 2015).

Foi visto ainda que as doses crescentes de N, afetou de forma linear a extração do N total, K e Cl pelo sorgo. Relatos anteriores já elucidaram a importância do N nas concentrações de N total e Cl na planta. O aumento linear na extração de K, se deve a ação sinérgica desse nutriente com o N.

Pesquisas confirmam que a absorção K é favorecida pela disponibilidade de NO₃ no solo, em função do equilíbrio das cargas elétricas durante a absorção e transporte de nutrientes no tecido vegetal, podendo favorecer também na passagem do nitrato pela membrana plasmática (RADDATZ et al., 2020).

4.4 A presença de Mo e N promoveram maiores aberturas estomáticas (gs) nas primeiras horas do dia

A condutância estomática é uma métrica que quantifica a permeabilidade dos estômatos, refletindo a habilidade das folhas para efetuar trocas gasosas (vapor d'água e dióxido de carbono) com o ambiente, devido à sua localização na epiderme foliar, os estômatos manifestam respostas ágeis às flutuações ambientais. Os principais fatores que influenciam a abertura e o fechamento dos estômatos são a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa que incide sobre a planta, as condições de disponibilidade de água, temperatura do ar e o estado nutricional da planta. Todos esses fatores variam com a época do ano e com o horário do dia.

As descobertas deste estudo mostram diferenças entre os ciclos, onde o ciclo planta foi superior em todos os horários em relação aos ciclos rebrota 1 e 2. Isso pode ter ocorrido devido ao maior período de precipitação nos ciclos rebrota 1 e 2, o que resultou em maior nebulosidade e, conseqüentemente, menor incidência de radiação no sorgo, reduzindo a abertura estomática. Já é conhecido que variáveis meteorológicas como a nebulosidade e temperaturas podem afetar essa variável através da influência da nebulosidade na quantidade de radiação que atinge a superfície das plantas (Xau et al., 2018) e no aumento da transpiração ocasionada pelas elevadas temperaturas (Khanthavong et al., 2022).

De acordo com Al-Salman et al (2023) há uma resposta fisiológica de conservação de água pela própria cultura, com o aumento da temperatura a taxa de evaporação da água das células estomáticas e das folhas em geral também aumenta, logo, isso cria um gradiente de potencial hídrico entre as células-guarda e o ambiente, levando ao fechamento dos estômatos como uma forma de conservar a água.

Segundo Zangani et al (2021), o nitrogênio influencia de maneira indireta na regulação da abertura estomática visto que é componente essencial dos aminoácidos, proteínas e clorofila, todos os quais desempenham papéis importantes na regulação dos processos relacionados com a abertura estomática enquanto que o molibdênio influencia a assimilação de nitrato, afetando indiretamente a abertura estomática por meio de seus efeitos na fotossíntese e no metabolismo de nitrogênio, além disso pode afetar a produção e a ação de fitormônios, como o ABA e o etileno, que desempenham papéis na regulação do fechamento estomático (JALAKAS et al., 2018 e JAMALI et al., 2023).

É possível que a reposta de maior abertura estomática com o aumento das doses do N e Mo pode ter resultado em uma maior regulação dessa estrutura, fazendo com que o sorgo tenha subsidio suficiente para controlar a abertura e fechamento estomático. Estudos realizados por Hou et al., (2021) corroboram com esse comportamento, onde seus resultados demonstram que plantas com níveis mais baixos de nitrogênio podem ser mais sensíveis ao estresse ambiental, como o próprio déficit hídrico ou altas temperaturas, isso pode levar a uma resposta de fechamento estomático mais acentuada em condições de estresse, à medida que a planta tenta reduzir a perda de água, fazendo isso por uma menor abertura estomática.

4.5 A atividade das enzimas antioxidantes foram afetadas pelos ciclos e adubação nitrogenada e molibdica

As espécies reativas de oxigênio (EROs) são moléculas ou íons que contêm oxigênio e exibem alta reatividade devido à presença de elétrons desemparelhados em sua estrutura eletrônica, a reatividade das EROs pode resultar em uma série de reações bioquímicas intracelulares e intercelulares nas plantas. A toxicidade resultante desses eventos pode induzir a morte celular, tornando evidente o potencial prejudicial das EROs em para as plantas (DUMANOVIĆ et al 2021).

A inativação de EROs é realizada por moléculas antioxidantes, como ascorbato, glutathione, vitamina E carotenoides, e por enzimas antioxidantes, como a catalase (CAT), superóxido dismutase e ascorbato peroxidase (TAIZ e ZEIGER, 2017). Por sua vez a catalase atua como parte do sistema antioxidante das plantas, que ajuda a decompor o peróxido de hidrogênio em água e oxigênio, evitando assim os danos oxidativos (YEMELYANOV et al., 2022).

No presente estudo, a CAT e APX lograram maior atividade com a maior dose de nitrogênio. Isso é devido ao aumento da disponibilidade de nitrogênio, levando a um aumento na síntese de enzimas, incluindo a catalase e ascorbato peroxidase, o que pode aumentar a capacidade das plantas de decompor o peróxido de hidrogênio (NEMATPOUR e ESHGHIZADEH, 2023). Estudos conduzidos por Ahmad et al., (2022) apontam para um comportamento semelhante aos observados neste trabalho.

Como visto, plantas expostas a condições de estresse oxidativo, como altos níveis de radicais livres, podem aumentar a síntese de enzimas antioxidantes, o nitrogênio contribui para dar capacidade das plantas de responder a esse estresse e juntamente com o molibdênio permite a produção de mais enzimas antioxidantes para neutralizar os danos oxidativos, portanto a importância da interação dos dois nutrientes é elucidada no presente estudo com a maior atividade da CAT ocorrendo na maior dose de Mo (160 g ha⁻¹) e na dose de 300 kg ha⁻¹ de N. O molibdênio é envolvido em processos relacionados ao metabolismo do nitrogênio, sendo co-fator da redutase do nitrato (SANTO et al., 2018). Desse modo, quanto mais N sendo metabolizado, ocorre maior aumento da formação de

aminoácidos, que são os blocos de construção das proteínas, influenciando diretamente na formação das enzimas, logo, um suprimento adequado de nitrogênio é necessário para a síntese de enzimas antioxidantes como a CAT (ASADI & ESHGHIZADEH 2021).

Para a rebrota 1 e 2 ambas lograram melhores atividades da APX quando fertilizadas com Mo, isso se deve ao fato que esse micronutriente é necessário para a síntese da molibdoenzima, um cofator da APX. Sem o molibdênio, a molibdoenzima não pode ser produzida, e a atividade da APX é comprometida. Isso pode levar a um acúmulo de peróxidos de hidrogênio e, conseqüentemente, ao dano oxidativo nas plantas. Assim, o molibdênio desempenha um papel crucial na proteção das plantas contra o estresse oxidativo, garantindo o funcionamento adequado da enzima APX.

6. CONCLUSÃO

Neste estudo, foi avaliado o efeito da suplementação de nitrogênio e molibdênio na produtividade do sorgo forrageiro sob déficit hídrico em regiões semiáridas, mostrando que a interação sinérgica desses nutrientes resultou em aumento da abertura estomática e da atividade enzimática de CAT e APX. Além disso, o aumento nos níveis de nitrogênio e nas condições meteorológicas durante o ciclo de rebrota 2 resultou em maiores concentrações e extração de nitrogênio, molibdênio, potássio e cloreto pelo sorgo forrageiro. Há uma influência positiva dos nutrientes N, Mo e K no aumento das variáveis de produção, como eficiência no uso da água e do nitrogênio, bem como na produtividade de massa verde e seca. Estes resultados fornecem suporte aos produtores quanto à adoção de estratégias de fertilização com nitrogênio e molibdênio, incorporando esses nutrientes de forma sinérgica no campo para otimizar o rendimento e melhorar a produtividade, mitigando os impactos do déficit hídrico em suas práticas de cultivo.

7. REFERÊNCIAS

Ahmad, I.; Zhu, G.; Zhou, G.; Song, X.; Hussein Ibrahim, M.E.; Ibrahim Salih, E.G. Effect of N on Growth, Antioxidant Capacity, and Chlorophyll Content of Sorghum. *Agronomy* 2022, 12, 501. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020501>

Al - Salman, Y., Cano, F. J., Pan, L., Koller, F., Piñeiro, J., Jordan, D., & Ghannoum, O. Anatomical drivers of stomatal conductance in sorghum lines with different leaf widths grown under different temperatures. *Plant, Cell & Environment*. 2023

Alves, O. F. et al. Características agronômicas de cultivares de sorgo em sistema de plantio direto no Semiárido de Pernambuco. *Revista Ciência Agrícola*, v. 14, n. 1, p. 29-36, 2016.

Araújo, G. J. et al. Estresse hídrico em plantas forrageiras: Uma revisão. *Pubvet*, [S. l.], v. 13, n. 01, 2019.

Asadi, M., & Eshghizadeh, H. R. Response of sorghum genotypes to water deficit stress under different CO₂ and nitrogen levels. *Plant Physiology and Biochemistry*, 158, 255-264, 2021

Aziez, Achmad Fatchul. Nutrient uptake and yield of rice (*Oryza sativa*) applied with mycorrhizal fungi using different doses of nitrogen and phosphorus fertilizers. *Research on Crops*, v. 23, n. 2, p. 261-266, 2022.

Azzouz-Olden, Farida; HUNT, Arthur G.; DINKINS, Randy. A análise do transcriptoma do genótipo SC56 do sorgo tolerante à seca em resposta ao estresse hídrico revela uma estratégia de defesa ao estresse oxidativo. *Relatórios de Biologia Molecular*, v. 5, pág. 3291-3303, 2020.

Banerjee, S., et al. Legacy effects of soil moisture on microbial community structure and N₂O emissions. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 95, p. 40-50, 2016.

Campelo, David H. et al. Crescimento, produção e eficiência de uso de água e nitrogênio do milho em lâmina d'água e adubação nitrogenada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 747-753, 2019.

- Colla, G. et al. Nitrogen-use efficiency traits of mini-watermelon in response to grafting and nitrogen-fertilization doses. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v. 174, n. 6, p. 933-941, 2011.
- Corrado, Giandomenico et al. Metabolic insights into the anion-anion antagonism in sweet basil: Effects of different nitrate/chloride ratios in the nutrient solution. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 21, n. 7, p. 2482, 2020.
- Dumanović, J., et al. The significance of reactive oxygen species and antioxidant defense system in plants: A concise overview. *Frontiers in plant science*, 11, 552969. (2021).
- Elhag, Khalid M.; ZHANG, Wanchang. Monitoring and assessment of drought focused on its impact on sorghum yield over Sudan by using meteorological drought indices for the period 2001–2011. *Remote Sensing*, v. 10, n. 8, p. 1231, 2018.
- EMBRAPA. Manual de métodos de análises de solos. 3^a ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de solos, 2009.212p.
- EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5^a ed. Brasília: Embrapa Solos, 2018.
- Enciso, J. et al. Yield, water use efficiency and economic analysis of energy sorghum in South Texas. *Biomass and Bioenergy*, v. 81, p. 339-344, 2015.
- Farhadi, A. et al. Effects of limited irrigation and nitrogen rate on the herbage yield, water productivity, and nutritive value of sorghum silage. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 53, n. 5, p. 576-589, 2022.
- Golla, B. Agricultural production system in arid and semi-arid regions. *J. Agric. Sci. Food Technol*, v. 7, n. 2, p. 234-244, 2021.
- Guo, X., Wu, Q., Zhang, Z., Zhu, G., & Zhou, G. (2023). Nitrogen and Phosphorus Counteracted the Adverse Effects of Salt on Sorghum by Improving ROS Scavenging and Osmotic Regulation. *Agronomy*, 13(4), 1020.

Habermann, Eduardo et al. O aquecimento e o déficit hídrico impactam a fotossíntese foliar e diminuem a qualidade e a digestibilidade da forragem de uma gramínea tropical C4. *Fisiologia Plantarum*, v. 2, pág. 383-402, 2019.

Heidarzade, Ayoub et al. Response of soybean (*Glycine max*) to molybdenum and iron spray under well-watered and water deficit conditions. *Journal of experimental biology and agricultural sciences*, v. 4, n. 1, p. 37-46, 2016.

Heshmat, Kazem et al. Assessment of physiological traits of common bean cultivars in response to water stress and molybdenum levels. *Journal of Plant Nutrition*, v. 44, n. 3, p. 366-372, 2021.

Horschutz, A. C. O., Cunha, F. N., Teixeira, M. B., Da Silva, E. C., Cabral Filho, F. R., & Alves, D. K. M. Crescimento e desenvolvimento foliar da cana-de-açúcar irrigada e fertilizada com diferentes fontes e doses de nitrogênio. *Irriga*, 27:296-310. 2022
<https://doi.org/10.15809/irriga.2022v27n2p296-310>

Hou, X., Xue, Q., Jessup, K. E., Zhang, Y., Blaser, B., Stewart, B. A., & Baltensperger, D. D. Effect of nitrogen supply on stay-green sorghum in differing post-flowering water regimes. *Planta*, 254, 1-11, 2021.

Hou, Y., Xu, X., Kong, L., Zhang, Y., Zhang, L., & Wang, L. Film-mulched drip irrigation achieves high maize yield and low N losses in semi-arid areas of northeastern China. *European Journal of Agronomy*, 146, 126819, 2023
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126819><https://doi.org/10.1007/s00425-021-03712-2>

Jalakas, P., Merilo, E., Kollist, H., & Brosché, M. ABA-mediated regulation of stomatal density is OST 1-independent. *Plant Direct*, 2(9), e00082, 2018.

Jamali, Z. H., Anwar, D. M., Ali, S., Qasim, M., & Song, C. Assessment of Molybdenum application on Soybean Physiological Characteristics in Maize-Soybean Intercropping. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1240146.

Jardim, A. M. R. F. et al. Estudos climáticos do número de dias de precipitação pluvial para o município de Serra Talhada-PE. *Revista Engenharia na Agricultura*, v. 27, n. 4, p. 330-337, 2019.

Jarecki, W. Soybean Response to Seed Inoculation or Coating with *Bradyrhizobium japonicum* and Foliar Fertilization with Molybdenum. *Plants*, 12, 2431, 2023 <https://doi.org/10.3390/plants12132431>

Jiang, N. et al. Soil water contents control the responses of dissolved nitrogen pools and bacterial communities to freeze-thaw in temperate soils. *BioMed Research International*, v. 2020, 2020.

Kaplan, M. et al. Water deficit and nitrogen affects yield and feed value of sorghum sudangrass silage. *Agricultural Water Management*, v. 218, p. 30-36, 2019.

Kaur, Manpreet et al. Crosstalk during the carbon–nitrogen cycle that interlinks the biosynthesis, mobilization and accumulation of seed storage reserves. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 22, n. 21, p. 12032, 2021.

Kazemi, E., Ganjali, H. R., Mehraban, A. et al. Produtividade e propriedades bioquímicas do sorgo granífero (*Sorghum bicolor* L. Moench) afetado por nanofertilizante sob estresse hídrico no campo. *Comunicações de Pesquisa de Cereais* 50, 397–405, 2022. [https://doi-org.ez19.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s42976-021-00198-2](https://doi.org.ez19.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s42976-021-00198-2)

Khan, M. et al. Effect of different nitrogen doses and deficit irrigation on nitrogen use efficiency and growth parameters of tomato crop under drip irrigation system. *Sarhad J. Agric*, v. 36, p. 319-323, 2020.

Khanthavong, P., et al., Combinational variation temperature and soil water response of stomata and biomass production in maize, millet, sorghum and rice. *Plants*, 11(8), 1039, 2022

Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift, Stuttgart*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

Kubar, Muhammad Saleem et al. Improving winter wheat photosynthesis, nitrogen use efficiency, and yield by optimizing nitrogen fertilization. *Life*, v. 12, n. 10, p. 1478, 2022.

Lamichhane, P., et al. Low-temperature plasma-assisted nitrogen fixation for corn plant growth and development. *International Journal of Molecular Sciences*, 22:5360, 2021 <https://doi.org/10.3390/ijms22105360>

Lamichhane, P. et al. Low-temperature plasma-assisted nitrogen fixation for corn plant growth and development. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 22, n. 10, p. 5360, 2021.

Leão, D. A S; et al. Estado nutricional de sorgo cultivado sob estresse hídrico e adubação fosfatada. *Pesq. Agropec. Trop.*, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 74-79, jan./mar. 2011

Li Y, C. et al. A irrigação deficitária em estágio de muda com aplicação de nitrogênio em estudo de campo de três anos fornece orientação para melhorar a produção de milho, água e nitrogênio usar eficiências. *Plantas* 11:3007, 2022 <https://doi-org.ez19.periodicos.capes.gov.br/10.3390/plants11213007>

Li, M. et al. Molybdenum Nanofertilizer Boosts Biological Nitrogen Fixation and Yield of Soybean through Delaying Nodule Senescence and Nutrition Enhancement. *ACS nano*, v. 17, n. 15, p. 14761-14774, 2023.

Martinez, V.; Cerda, A. Influência da fonte de N na taxa de absorção de Cl, N, Na e K por mudas de pepino cultivadas em condições salinas. *Revista de Nutrição Vegetal*, v. 8, pág. 971-983, 1989.

Mellis, E. V. et al. Molybdenum increases nitrogen use efficiency of sugarcane under limited N supply. *Journal of Plant Nutrition*, v. 45, n. 9, p. 1360-1369, 2022.

Michael, Y. B., et al. Fertilizing effect of human urine and ammonium nitrate as sources of nitrogen for sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] under saline conditions, *Journal of Plant Nutrition*, 44:13, 1957-1970, 2021 DOI: 10.1080/01904167.2021.1884710

Miranda, S. R. et al. Ammonium improves tolerance to salinity stress in *Sorghum bicolor* plants. *Plant growth regulation*, v. 78, p. 121-131, 2016.

Missio, R. L. et al. Overseeding annual summer pastures on soybean crops to overcome the autumnal forage shortage. *Ciência Rural*, v. 54, p. e20220588, 2023.

Mundia, C. W., et al. A regional comparison of factors affecting global sorghum production: The case of North America, Asia and Africa's Sahel. *Sustainability*, 11(7), 2135, 2019.

Nasar, J. et al. Nitrogen fertilization coupled with foliar application of iron and molybdenum improves shade tolerance of soybean under maize-soybean intercropping. *Frontiers in Plant Science*, v. 13, p. 1014640, 2022.

Nematpour, A., Eshghizadeh, H. R. Respostas bioquímicas do sorgo e do milho aos impactos de diferentes níveis de déficit hídrico e fornecimento de nitrogênio. *Comunicações de Pesquisa de Cereais*, 2023. <https://doi-org.ez19.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s42976-023-00411-4>

Neto, A. C. et al. Effect of molybdenum and nitrogen rates on the growth and vegetative structure of *Megathyrus maximus* (Syn. *Panicum maximum*). 2023.

Neumann, M. et al. Influência do espaçamento entre linhas e da densidade de semeadura no cultivo do sorgo em manejo de cortes. *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias*, v. 3, n. 3, 2011.

Ostmeyer, T. J. et al. Impact of in-season split application of nitrogen on intra-panicle grain dynamics, grain quality, and vegetative indices that govern nitrogen use efficiency in sorghum. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. v.186, n. 4 367-474 Agosto de 2023

Polityka Insight. Relatório sobre o Impacto do Acordo Verde Europeu na Agricultura Polaca; Polityka Insight: Varsóvia, Polônia, 2021.

Raddatz, et al. Coordinated transport of nitrate, potassium, and sodium. *Frontiers in Plant Science* v. 11, p247–18, 2020.

Rashid, J. Ryan. *Journal of Plant Nutrition*. Vol. 27, No. 6, pp. 959–975, 2004

Rosado, T. L. et al. Nutrition of conilon coffee under fertilization of nitrogen and molybdenum. *Journal of Plant Nutrition*, v. 45, n. 4, p. 558-571, 2021.

Ru, C. et al. Nitrogen modulates the effects of heat, drought, and combined stresses on photosynthesis, antioxidant capacity, cell osmoregulation, and grain yield in winter wheat. *Journal of Plant Growth Regulation*, v. 42, n. 3, p. 1681-1703, 2023.

Samir G. A. et al. Water Deficit Irrigation and Nitrogen Response of Sudan Grass under Arid Land Drip Irrigation Conditions. *Irrigation e drenar* v.66, p.365–376, 2017.

Santos, F. C. et al. Adubação nitrogenada e potássica na nutrição e na extração de macronutrientes pelo sorgo biomassa. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v. 14, n. 1, p. 10-22, 2015.

Santos, F. D. et. al. Fatores que afetam a disponibilidade de micronutrientes no solo. *Tecno-Lógica*, v. 25, n. 2, p. 272-278, 5 jul. 2021.

Santos, F. C., et al. Adubação nitrogenada e potássica na nutrição e na extração de macronutrientes pelo sorgo biomassa. *Revista brasileira de milho e sorgo*, 14 (1), 10–22. 2015.

Santos, R. L. D., et al. Nitrate reductase activity and nitrogen and biomass accumulation in sugarcane under molybdenum and nitrogen fertilization. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 43, 2019.

Santos, R. L. et al. Nitrate reductase activity, productivity and technological quality of sugarcane under molybdenum and nitrogen fertilization. *Sugar Tech*, p. 1-10, 2022.

Sekhon, R. S. et al. Stover composition in maize and sorghum reveals remarkable genetic variation and plasticity for carbohydrate accumulation. *Frontiers in plant science*, v. 7, p. 822, 2016.

Siddiqi, M.Y.; Glass, A.D.M. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. *Journal of Plant Nutrition*, v.4, n.3, p.289-302, 1981.

Silva, T. G. F. et al. Cactus–sorghum intercropping combined with management interventions of planting density, row orientation and nitrogen fertilization can optimize water use in dry regions. *Science of The Total Environment*, p. 165102, 2023.

Taiz, L.; Zeiger, E. *Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal*. Ed. 6ª. Editora: Artmed, 2017.

The, S., Snyder, R., & Tegeder, M. Targeting Nitrogen Metabolism and Transport Processes to Improve Plant Nitrogen Use Efficiency. *Frontiers in Plant Science*, 11, 2021. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.628366>.

Venâncio, et al. Teores e extração de macronutrientes pelas folhas do abacaxizeiro ‘vitória’ sob adubação potássica e lâminas de irrigação. *irriga*, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 400–419, 2017.

Verma, S. K. et al. Influence of irrigation regimes and weed management practices on water use and nutrient uptake in wheat (*Triticum aestivum* L. Emend. Fiori and Paol.). *Bangladesh Journal of Botany*, v. 44, n. 3, p. 437-442, 2015.

Wei, W. et al. Appropriate nitrogen application enhances saponin synthesis and growth mediated by optimizing root nutrient uptake ability. *Journal of Ginseng Research*, v. 44, n. 4, p. 627-636, 2020.

Xu, H. et al. Regulations of cloudiness on energy partitioning and water use strategy in a riparian poplar plantation. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2018
<https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2018.07.008>.

Yemelyanov, V. V. Activities of catalase and peroxidase in wheat and rice plants under conditions of anoxia and post-anoxic aeration. *Russian Journal of Plant Physiology*, 69(6), 117, 2022.

Zangani, E., et al. Nitrogen and phosphorus addition to soil improves seed yield, foliar stomatal conductance, and the photosynthetic response of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Agriculture*, 11(6), 483, 2021.

Ziki, S. J. L. et al. Influence of cutting date and nitrogen fertilizer levels on growth, forage yield, and quality of sudan grass in a semiarid environment. *International Journal of Agronomy*, v. 2019, p. 1-9, 2019.