UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

AMANDA MICHELE SANTOS DE LIMA

ADUBAÇÃO FOLIAR COM NÍQUEL E UREIA EM CANA-DE-AÇÚCAR

RECIFE

2025

Amanda Michele Santos de Lima
Bacharela em Ciências Biológicas
Engenheira Agrônoma

Adubação foliar com níquel e ureia em cana-de-açúcar

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo.

Orientador:
Prof. Dr. Emídio Cantídio Almeida de Oliveira

Co-orientadores:
Prof. Dr. Renato Lemos dos Santos
Dra. Fabiana Aparecida Cavalcante Silva
Prof. Dr. José Lavres Júnior

Recife
2025

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE

Bibliotecário(a): Auxiliadora Cunha – CRB-4 1134

L732a Lima, Amanda Michele Santos de.

Adubação foliar com níquel e ureia em cana-de-açúcar / Amanda Michele Santos de Lima. – Recife, 2026.

134 f.; il.

Orientador(a): Emídio Cantídio Almeida de Oliveira.

Co-orientador(a): Renato Lemos dos Santos.

Co-orientador(a): Fabiana Aparecida Cavalcante Silva.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, BR-PE, 2025.

Inclui referências e apêndice(s).

1. Urease. 2. Nitrogênio - Fixação. 3. Cana-deaçúcar - Nutrição . 4. Nutrientes minerais do solo 5. Fisiologia vegetal. I. Oliveira, Emídio Cantídio Almeida de, orient. II. Santos, Renato Lemos dos, coorient. III. Silva, Fabiana Aparecida Cavalcante, coorient. IV. Título

CDD 631.4

AMANDA MICHELE SANTOS DE LIMA

Adubação foliar com níquel e ureia em cana-de-açúcar

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo.

Aprovada em 27 de fevereiro de 2025.

Prof. Dr. Emídio Cantídio Almeida de Oliveira

Orientador

Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

Dr. Eduardo Cézar Medeiros Saldanha

US Borax / Rio Tinto

Prof. Dr. José Lavres Júnior

Universidade de São Paulo

Prof. Dr. André Rodrigues dos Reis

Universidade Estadual Paulista

Prof. Dr. Fernando José Freire

Universidade Federal Rural de Pernambuco

À minha família,
Meu pai, Edvaldo
Minha mãe, Irani
Minha irmã, Andréia
Meu sobrinho, Miguel

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo pelo aprendizado ao longo da trajetória acadêmcia. À CAPES pela conceção da bolsa de estudos.

À UFRPE por me acolher, pelas oportunidades de crescimento. Às equipes dos laboratórios de Física do Solo, Química do Solo, Química Ambiental do Solo e LabPlanta, pela colaboração e receptividade.

À Yara Fertilizantes pelo financiamento do projeto e à Eduardo Saldanha por intermediar essa parceria. Nosso projeto foi contemplado pelo Prêmio Boa Colheita Pesquisa (2020), um edital de abrangência nacional, que foi motivo de orgulho para nosso grupo. Foi especialmente satisfatório interagir com a equipe da Yara durante a parceria.

À Ubyfol, nas pessoas de Lucilo, Poliana e Danilo, por aceitar fazer parte do projeto e participar ativamente dos campos. À Agromape e Fertine/Fertipar pela parceria com insumos especiais.

Ao CETENE pela parceria, em especial à Dra. Fabiana Aparecida, que me cedeu tudo que um aluno de doutorado precisa! Muito obrigada! À Rafael Vilela pela amizade e apoio.

Ao IFPE Campus Vitória de Santo Antão pela parceria, em especial ao Prof. Renato Santos pela disponibilidade, parceria e colaboração. É um privilégio ter sua orientação.

À Miriri Alimentos e Bioenergia por disponibilizar a área experimental e todo apoio na condução do meu experimento, especial a Antônio Emídio e Jadson Trajano, que me acompanham desde o mestrado. Agradeço ao Dr. Pedro Souza e Gabriel Saturnino pela confiança e colaboração, e pelo convite de fazer parte da equipe.

Aos colegas do setor canavieiro que tanto me motivaram nesses anos a estudar, buscar por soluções aos desafios do setor. Em especial aos colegas Silas Alves, Franciele Macedo, José Neto e Wagner Moura, por abrirem as portas para receber meu projeto.

Aos amigos Lucilo Morais, Wagner Moura, Igor Furtado, Joao Luna, Valeska Regina, Venâncio Veloso, Jaciane Rosa pelo suporte emocional, profissional e logístico. A amizade de vocês tornou tudo mais leve!

Ao grupo de pesquisa GNAF, pela colaboração ao longo desse processo, em especial à minha equipe de campo e de pesquisa Larissa Batista, Arielena Augusta e Jackelyne Gomes, que toparam todos os meus convites trabalhosos. Poder contar com a dedicação, compromisso e vontade de aprender de vocês foi motivador e muito importante!

Aos amigos Luan Rafael, Luiz Lima, Joel Andrade e Crissogno Mesquita. Foi muita sorte dividir o curso com vocês! Eu tive a sorte de estar acompanhada de gente muito boa! A sorte de ter o terceiro turno!

À Dra. Paula Renata, Dr. Luiz Lima, Dra. Clarissa Buarque e Dr. Gabriel Máximo por serem inspiração ao que de melhor existe na trajetória acadêmica, de ciência e humanidade, e por me ensinarem a ver quem eu sou.

À Larissa Batista, em quem depositei tempo e confiança, e me retribuiu com a melhor parceria de trabalho e para a vida!

À Valeska Regina que me apoio num momento tão importante! Você nem sabe como foi importante poder contar com seu apoio!

Aos professores Mário Lira, Ana Dolores, Fernando Freire, Maria Betânia e Valdomiro, por serem inspiradores através de seus ofícios e pelo que demonstraram ser como pessoas. É um orgulho ter sido aluna de vocês.

Ao professor Valdomiro pela amizade e cuidado na trajetória de pós-graduação, sempre presente e disponível.

Ao meu orientador Prof. Emídio Oliveira, pela trajetória de parceria, por me oportunizar viver experiências que me desafiaram para além do meu doutoramento, e que foram importantes para minha vida profissional e pessoal. Pelas diferentes formas de mostrar meu potencial, e onde e como eu poderia evoluir. Agradeço a confiança, paciência, liberdade de trabalho, e pelas discussões técnicas e científicas que tanto me ensinaram e me amadureceram. Foi muito trabalho, muito aprendizado, identificação, crescimento e satisfação com tudo que vivi. Também agradeço a sua amizade, concordâncias e divergências, tudo que compartilhamos durante os anos de orientação. Muito obrigada!

À minha família por sempre estar presente, me apoiar, me influenciar a ser melhor, vibrar com cada passo meu, compreender minhas ausências. Vocês me movem, me encorajam e tornam minha vida mais leve. Eu amo vocês!

Foi um privilégio viver tudo isso, ter por perto pessoas generosas e inspiradoras!

“Deus se revela no que buscamos, em quem nos apoiamos e naquilo que recebemos.”

Eu não fiz nada sozinha!

“Tudo que fizerem, façam de todo o coração”

Adubação foliar com níquel e ureia em cana-de-açúcar

RESUMO GERAL

A produção de biomassa da cana-de-açúcar é limitada pelo fornecimento de nitrogênio (N) e a baixa recuperação do N-fertilizante pelas plantas reduz o potencial produtivo dos canaviais. A adubação foliar com N de forma complementar à adubação via solo nas fases de maior demanda pelo nutriente é uma alternativa para aumento da recuperação do N-fertilizante e da conversão do N em biomassa. A ureia é a principal fonte de N para adubação via folha e estimula a atividade da enzima urease. Esse estímulo depende da disponibilidade de níquel (Ni), elemento ativador da enzima, cujos limites de dose ainda não foram definidos para a cana-de-açúcar. O aumento da dose de ureia foliar para complementar a adubação de solo pode ser viabilizado pela combinação de ureia e Ni, sem risco de queima foliar. O objetivo do estudo foi avaliar a adição de Ni na pulverização foliar com ureia no estímulo do metabolismo de nitrogênio, no desenvolvimento vegetativo, e o potencial desse manejo nutricional na redução da dose de N via solo, sem comprometer a produtividade da cana-de-açúcar. Os estudos foram conduzidos em casa de vegetação e campo, em delineamento de blocos ao acaso com 4 repetições, e arranjo de tratamentos em fatorial, com doses crescentes de ureia e Ni, realizando coletas sequenciais após a pulverização foliar. As variáveis avaliadas foram atividade da urease (AU), teor de ureia (TU), teor de amônio solúvel (AS), teor de aminoácidos (AA), peroxidação lipídica (MDA), índices de clorofila, teor de N e Ni, biometria da parte aérea, rendimento industrial. Os dados foram submetidos à análise de variância ($p \leq 0,05$) e regressão linear. A adição de Ni não aumentou a atividade da urease da cana-de-açúcar. Ureia e Ni de forma isolada aumentaram o teor de N e Ni, AS, AA e TU. Ni comprometeu a eficiência fotossintética de forma reversível. Houve remobilização de N e Ni para porções mais novas na planta. A queima do tecido foliar não foi amenizada pelo Ni, e não foram causadas pela alta concentração de amônio. O Ni atuou na redução do teor de amônio em plantas que receberam 29 % de ureia. O aumento da dose de ureia e Ni não aumenta os teores dos nutrientes no tecido. O estresse associado aos tratamentos foi leve. Houve aumento do rendimento em açúcar com a combinação de ureia + Ni. O manejo combinado de ureia+Ni utilizando doses baixas apresentaram o melhor desempenho, sem risco de distúrbios bioquímicos. A combinação de ureia e Ni para estímulo da produção da cultura ainda precisa ser avaliado em mais ciclos da cultura, e no início do crescimento de colmos para aumentar o potencial produtivo e viabilizar a redução da adubação via solo.

Palavras-chave: Atividade da urease. Assimilação de amônio. Nutrição da cana-de-açúcar. Remobilização de nutrientes. Toxidez por amônio.

Nickel and urea spraying on sugarcane

GENERAL ABSTRACT

Sugarcane biomass production is limited by nitrogen (N) supply, and the low recovery of N-fertilizer by plants reduces the efficiency of N management in cropping systems. Foliar N fertilization, complementing soil-applied N during periods of high nutrient demand, is an alternative to enhance N-fertilizer recovery and improve N conversion into biomass. Urea is the primary N source for foliar fertilization, stimulating urease enzyme activity. This stimulation depends on the availability of nickel (Ni), an enzyme activator, whose optimal dosage limits for sugarcane remain undefined. Increasing foliar urea doses to complement soil fertilization may be feasible through urea and Ni combination, without causing leaf burn. This study aimed to evaluate the addition of Ni in foliar urea spraying to stimulate nitrogen metabolism, vegetative growth, and its potential to reduce soil N application without compromising sugarcane productivity. The study was conducted in both greenhouse and field conditions, following a randomized block design with four replications and a factorial treatment arrangement, consisting of increasing urea and Ni doses, with sequential sampling after foliar spraying. The evaluated variables included urease activity (UA), urea content (UC), soluble ammonium (SA), amino acid content (AA), lipid peroxidation (MDA), chlorophyll indices, N and Ni content, shoot biometrics, and industrial yield. Data were subjected to analysis of variance ($p \leq 0.05$) and linear regression. Ni addition did not increase urease activity in sugarcane. Urea and Ni individually increased N and Ni content, SA, AA, and UC. Ni temporarily reduced photosynthetic efficiency. N and Ni were remobilized to younger plant tissues. Leaf tissue burn was not mitigated by Ni and was not caused by high ammonium concentration. Ni reduced ammonium levels in plants receiving 29% urea. Increasing urea and Ni doses did not enhance nutrient accumulation in plant tissues. Treatment-associated stress was mild. Sugar yield increased with the urea + Ni combination. The best performance was observed with low urea + Ni doses, without inducing biochemical disturbances. The combined urea and Ni management strategy for enhancing sugarcane production requires further evaluation in additional crop cycles and anticipated to the arly stalk growth phase to enhance yield potential and enable the reduction of soil fertilization. to assess its potential for reducing soil N fertilization.

Keywords: Urease activity. Ammonium assimilation. Sugarcane nutrition. Nutrient remobilization. Ammonium toxicity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de montagem dos vasos (A) e distribuição das unidades experimentais em casa de vegetação (A). 46
Figura 2 – Registro do plantio (A) e da emergência das plantas (B), aos sete dias após o plantio 48
Figura 3 – Curva característica de retenção de água no solo. Modelo para o teor de água (θ) em função do potencial matricial (Ψ_m) para o substrato arenoso utilizado no experimento, ajustado pela equação de Van Genuchten. (--) Umidade e tensão na capacidade de campo. 49
Figura 4 – Monitoramento mensal da temperatura máxima (T.Máx) e mínima (T.Mín), umidade máxima (U.Máx) e mínima (U.Mín) da casa de vegetação e do volume de água utilizado por vaso no período de 120 dias. 49
Figura 5 – Índice Falker de clorofila total após a remoção de N da solução nutritiva 53
Figura 6 – Descrição das unidades experimentais e registro da pulverização foliar 53
Figura 7 – Leitura do índice de clorofila (A) e fluorescência da clorofila (B) na folha +1 55
Figura 8 – Procedimento de coleta de folha para análise bioquímica 56
Figura 9 – Metabolismo de ureia na folha +1 da cana-de-açúcar, após a pulverização foliar de Ni e ureia 62
Figura 10 – Teor de amônio solúvel na folha +1 da cana-de-açúcar, após a pulverização foliar de Ni e ureia 63
Figura 11 – Índices de fluorescência da clorofila a na folha +1 de cana-de-açúcar, aos 3 dias após a pulverização foliar de Ni e ureia 64
Figura 12 – Rendimento quântico máximo (Fv/Fm) do fotossistema II da folha não pulverizada da cana-de-açúcar, aos 7 dias após a pulverização foliar de Ni e ureia. 65
Figura 13 - Índice Falker de clorofila a (IFCa) na folha +1 da cana-de-açúcar, aos 7 dias após a pulverização foliar de Ni e ureia 65
Figura 14 - Biometria dos entrenós da cana-de-açúcar, aos 7 dias após a pulverização foliar de Ni e ureia 67
Figura 15 – Teor de nutrientes biomassa seca da parte aérea da cana-de-açúcar, aos 7 dias após a pulverização foliar de ureia e Ni. 68
Figura 16 - Formação geológica de Tabuleiros costeiros no litoral do Nordeste (cor vermelha). Destaque para a localização do campo experimental no Estado da Paraíba. .. 89

Figura 17 - Localização da área experimental e descrição das unidades experimentais. Destaque para a área útil, subdividida para amostragem destrutiva e não destrutiva..... 90
Figura 18 - Preparo de calda e aplicação de micronutrientes via solo..... 91
Figura 19 - Precipitação pluviométrica e irrigação durante o ciclo..... 92
Figura 20 – Marcação da folha +1 na área útil de cada parcela 93
Figura 21 – Preparo e monitoramento da calda de pulverização..... 94
Figura 22 – Registros da pulverização foliar em campo..... 95
Figura 23 – Leitura dos índices de clorofila..... 97
Figura 24 – Procedimento de coleta de folha +1 para análise bioquímica 98
Figura 25 – Teor de amônio solúvel e aminoácidos solúveis na folha +1 da cana-de-açúcar, aos 2 dias após pulverização foliar com Ni e ureia..... 106
Figura 26 – Teor de aminoácidos solúveis na folha +1 da cana-de-açúcar, aos 18 dias após pulverização foliar com Ni e ureia..... 106
Figura 27 – Índices de clorofila a na folha da cana-de-açúcar, aos 50 dias após a pulverização foliar com Ni e ureia..... 107
Figura 28 – Teor de nitrogênio (N) total na folha +1 da cana-de-açúcar, após a pulverização foliar com Ni e ureia 108
Figura 29 – Teor de níquel (Ni) na folha +1 da cana-de-açúcar, após a pulverização foliar com Ni e ureia..... 109
Figura 30 – Produção de biomassa seca da parte aérea aos 50 dias após a pulverização foliar com Ni e ureia 110
Figura 31 – Biometria da parte aérea da cana-de-açúcar pulverizada com Ni e ureia via foliar, no momento da colheita..... 110
Figura 32 – Níquel (Ni) acumulado na biomassa seca da parte aérea no final do ciclo de produção da cana-de-açúcar, após a pulverização foliar com Ni e ureia..... 111
Figura 33 – Produtividade de açúcar na colheita da cana-de-açúcar, após a pulverização com Ni e ureia..... 111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização química e física do substrato arenoso 47
Tabela 2 – Descrição dos tratamentos do experimento conduzido em casa de vegetação 52
Tabela 3 – Propriedades químicas das soluções de aplicação foliar 52
Tabela 4 – Quantidade de elementos aplicados usando 1,0 mL de solução por folha 54
Tabela 5 - Análise de variância dos índices de clorofila a da folha da cana-de-açúcar, após a pulverização foliar de Ni e ureia 59
Tabela 6 - Análise de variância das variáveis bioquímicas do metabolismo de ureia na folha +1 da cana-de-açúcar pulverizada com ureia e Ni 60
Tabela 7 - Análise de variância da biometria da cana-de-açúcar, aos 7 dias após a pulverização foliar de Ni e ureia (120 DAP) 60
Tabela 8 - Análise de variância do teor de Ni e N na biomassa seca da parte aérea da cana-de-açúcar, aos 7 dias após a pulverização foliar de Ni e ureia (120 DAP) 60
Tabela 9 - Caracterização do solo da área do campo experimental 89
Tabela 10 – Descrição dos tratamentos do experimento conduzido em campo 93
Tabela 11 – Descrição da composição e propriedades químicas das caldas de cada tratamento 94
Tabela 12 – Análise de variância das variáveis bioquímicas avaliadas na folha +1 da cana-de-açúcar, após a pulverização foliar com Ni e ureia 103
Tabela 13 – Análise de variância do teor de nutrientes na folha +1 da cana-de-açúcar, após a pulverização foliar com Ni e ureia 104
Tabela 14 – Análise de variância dos índices de clorofila a na folha da cana-de-açúcar, após a pulverização foliar com Ni e ureia 104
Tabela 15 – Análise de variância das medidas de altura e diâmetro da cana-de-açúcar, após a pulverização foliar com Ni e ureia 104
Tabela 16 – Análise de variância do acúmulo de biomassa seca dos componentes da cana-de-açúcar, aos 50 dias após a pulverização foliar com Ni e ureia 105
Tabela 17 – Análise de variância da produtividade, acúmulo de biomassa seca e de nutrientes na parte aérea da cana-de-açúcar após a pulverização foliar com Ni e ureia, no final do ciclo de produção (330 DAC) 105

Tabela 18 – Análise de variância dos atributos de qualidade agroindustrial da cana-de-açúcar pulverizada com Ni e ureia via foliar, no final do ciclo de produção (330 DAC) 105

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL 17

1.1. Hipóteses 18

1.2. Objetivos 18

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 19

2.1. Importância agrícola da cana-de-açúcar no brasil e no mundo 19

2.2. Adubação nitrogenada na cultura da cana-de-açúcar 20

2.3. Adubação foliar e vias de absorção de nutrientes 21

2.4. Adubação foliar com ureia para eficiência de uso do n-fertilizante 24

2.5. Níquel como nutriente de plantas e seu papel no metabolismo de nitrogênio 25

2.6. Adubação foliar com ureia e níquel para aumento do aproveitamento da ureia exógena 29

Referências Bibliográficas 32

3. CAPÍTULO II – METABOLISMO DA UREIA NA CANA-DE-AÇÚCAR COM APLICAÇÃO DE NÍQUEL VIA FOLIAR 43

3.1. Introdução 45

3.2. Material e Métodos 46

3.2.1. *Caracterização do substrato* 46

3.2.2. *Condução experimental* 47

3.2.3. *Manejo nutricional* 50

3.2.4. *Pulverização foliar e distribuição dos tratamentos* 51

3.2.5. *Períodos de coleta de dados* 54

3.2.6. *Procedimentos de coleta de dados* 55

3.2.7. *Determinação em laboratório* 57

3.2.8. *Análise estatística* 58

3.3. Resultados 59

3.3.1. ***Bioquímica do metabolismo da ureia*** **..... 61**

3.3.2. ***Índices de clorofila a*** **..... 64**

3.3.3. ***Biometria*** **..... 66**

3.3.4. ***Teor total de Ni e N na biomassa seca da parte aérea*** **..... 67**

3.4. Discussão 69

3.4.1. ***Metabolismo de ureia na cana-de-açúcar*** **..... 70**

3.4.2. ***Avaliação do estresse*** **..... 72**

3.4.3. ***Nutrição e produção de biomassa da cana-de-açúcar*** **..... 75**

3.5. Conclusões 78

Referências bibliográficas 79

4. CAPÍTULO III - REDUÇÃO DA ADUBAÇÃO NITROGENADA COM USO DA PULVERIZAÇÃO FOLIAR DE UREIA E NÍQUEL EM CANA-DE-AÇÚCAR 85

4.1. Introdução 87

4.2. Material e Métodos 88

4.2.1. ***Localização da área experimental e condições de cultivo*** **..... 88**

4.2.2. ***Caracterização da área experimental*** **..... 88**

4.2.3. ***Condução experimental*** **..... 91**

4.2.4. ***Pulverização foliar e distribuição dos tratamentos*** **..... 92**

4.2.5. ***Período de coleta de dados*** **..... 96**

4.2.6. ***Procedimentos de coleta*** **..... 97**

4.2.7. ***Determinação em laboratório*** **..... 100**

4.2.8. ***Análise estatística*** **..... 102**

4.3. Resultados 103

4.3.1. ***Bioquímica do metabolismo de ureia*** **..... 105**

4.3.2. ***Índices de clorofila a*** **..... 107**

4.3.3. ***Nutrientes na folha +1*** **..... 107**

4.3.4. ***Biometria*** **..... 109**

4.3.5. *Acúmulo de nutrientes na parte aérea* 110

4.3.1. *Rendimento e qualidade industrial*..... 110

4.4. Discussão 112

4.4.1. *Metabolismo da ureia*..... 112

4.4.2. *Avaliação do estresse*..... 114

4.4.3. *Nutrição e produção de biomassa da parte aérea*..... 115

4.4.4. *Rendimento industrial da cana-de-açúcar* 117

4.5. Conclusões..... 118

Referências bibliográficas..... 119

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 124

APÊNDICE A – Padrão de desenvolvimento das plantas aos 7 dias após a pulverização foliar de Ni e ureia. Experimento conduzido em casa de vegetação. . 126

APÊNDICE B – Avaliação visual dos danos foliares nas primeiras 24 horas APF, em casa de vegetação..... 127

APÊNDICE C – Avaliação visual aos 7 dias após a pulverização foliar, em casa de vegetação..... 128

APÊNDICE D – Modelos de comportamento dos dados biométricos aos 7 dias após a pulverização foliar com Ni e ureia. Estudo conduzido em casa de vegetação. 130

APÊNDICE E – Registros das plantas antes da colheita em campo. 131

1. INTRODUÇÃO GERAL

A crescente demanda por alimento e biocombustíveis, e a busca por sistemas de produção sustentáveis tem valorizado a cadeia produtiva da cana-de-açúcar. A alta capacidade de produção de biomassa e sacarose faz da cultura a principal matéria-prima para a produção sustentável de açúcar e etanol, sendo a produção brasileira uma das mais importantes no mundo.

A produção de biomassa da cana-de-açúcar é limitada pela disponibilidade de nitrogênio (N). A baixa eficiência do fertilizante nitrogenado devido às vias de transformações e perdas de N. O principal desafio do manejo sustentável da produção é promover a nutrição nitrogenada com uso mais racional de N-fertilizante, reduzindo as perdas e aumentando a produção.

O manejo do N combinando adubação via foliar e via solo pode ser uma alternativa para aumento da eficiência do N-fertilizante, visto que reduz as etapas de transformações e possui maior recuperação pela planta do fertilizante aplicado. Além disso, a via foliar possibilita o fornecimento do N na fase de alta demanda metabólica por N, quando a adubação de solo é inviável e promover maior conversão do N aplicado em biomassa.

A ureia é fonte de N mais concentrada em N e com maior permeabilidade na cutícula. Uma vez absorvida, a ureia precisa ser hidrolisada pela enzima urease para liberação do amônio e prevenir danos pelo acúmulo ureia na célula. O níquel (Ni) é o ativador da urease pela ativação da enzima, cuja disponibilidade aumenta a atividade da enzima. A combinação de Ni e ureia no manejo nutricional aumenta a atividade da enzima e os solutos gerados após essa reação irão ativar outros processos bioquímicos que culminam no crescimento da planta.

Por ser uma via de maior recuperação pela planta, o aumento da carga de N via folha desloca parte da adubação do solo para a folha, para assim reduzir as perdas. A associação ureia + Ni pode possibilitar esse aumento sem causar injúrias à folha, e assim, aumentar a eficiência de uso do N. Nesse contexto, haveria maior disponibilidade de N para as plantas, sem aumentar a dose total, ou mesmo reduzindo a dose, resultando na mesma ou no aumento da produção.

Pode viabilizar redução da dose via solo. Como na folha há maior recuperação e utilização mais rápida do nutriente, o ajuste de dose de N e Ni via folha pode resultar na redução da quantidade final de fertilizante utilizada no ciclo, caso a eficiência de doses menores seja semelhante àquelas praticadas atualmente. Essa proposta concorda com a atual demanda de manejo sustentável da cultura, com impactos ambientais e financeiros no manejo da cultura.

O manejo do Ni na nutrição da cana-de-açúcar é ainda incipiente. Poucos estudos abordam a sua contribuição para produção de cana-de-açúcar, de forma que informações sobre níveis críticos na folha e acúmulo na parte área são escassos. Como micronutriente metálico, o

excesso de Ni pode causar toxidez, com impactos sobre aspectos fisiológicos e morfológicos das plantas. E a inserção desse nutriente na nutrição da cultura requer o estudo criterioso de dose.

O objetivo desse estudo é avaliar a adição de Ni na calda de pulverização foliar com ureia sobre o estímulo da assimilação de N-ureia, desenvolvimento vegetativo e produção da cana-de-açúcar, bem como avaliar o potencial desse manejo nutricional na redução da dose de N via solo, sem comprometer a produtividade da cultura.

1.1. Hipóteses

- A adição de Ni na adubação foliar com ureia de forma complementar à adubação via solo permite aumentar a dose de ureia via folha em cana-de-açúcar;
- A adubação foliar com ureia e Ni possibilita redução da dose de N via solo sem comprometer a produtividade da cana-de-açúcar.

1.2. Objetivos

Objetivo Geral

Avaliar o efeito do Ni aplicado junto à ureia via foliar sobre o metabolismo do N-ureia (Capítulo 2), e o potencial do manejo na redução da dose de N via solo no manejo nutricional da cana-de-açúcar (Capítulo 3).

Objetivos específicos

- Avaliar a contribuição do Ni na assimilação do N-ureia aplicado via foliar;
- Identificar a dose de Ni combinado com ureia via foliar que promove aumento da assimilação de N-ureia;
- Avaliar o efeito da redução da dose de N aplicada no ciclo sobre o desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar adubada com ureia e Ni foliar.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Importância agrícola da cana-de-açúcar no Brasil e no mundo

A cana-de-açúcar é a principal matéria-prima para a produção de açúcar no mundo, e a mais eficiente para produção mundial de biocombustíveis, como etanol, butanol, biogás e biodiesel. Os cultivares modernos de cana-de-açúcar são híbridos do complexo *Saccharum* spp. selecionados para alta capacidade de acúmulo de sacarose no colmo e adaptação aos estresses bióticos e abióticos. Isso possibilitou lavouras produtivas em mais de 120 países, tanto tropicais como subtropicais (BUDEGUER et al., 2021; SILVA, 2017).

As características biológicas e agronômicas, e o sistema de industrialização da cana-de-açúcar são mais eficientes quando comparado à outras culturas sucroalcooleiras (BUDEGUER et al., 2021). O metabolismo C4 da cana-de-açúcar confere eficiência de uso de insumos, o que resulta em alta conversão de CO_2 em biomassa. Isso torna o balanço energético dos canaviais mais positivo, superando lavouras de beterraba, milho e sorgo (BORDONAL et al., 2018).

O aumento da biomassa também aumenta a produção de subprodutos da industrialização da cana-de-açúcar, que retornam à cadeia produtiva. A vinhaça, torta-de-filtro e cinzas são utilizados como fertilizante e condicionadores de solo no campo. Já o bagaço retorna como energia calorífica para as caldeiras na indústria. Outros subprodutos podem ser comercializados, sendo reaproveitados como a levedura para ração animal, o bagaço e palhada para produção de energia, papel, bioplástico, e como matéria-prima para a indústria bioquímica (UNGUREANU; VLADUT; BIRIS, 2022).

O Brasil se destaca como maior celeiro mundial de produção da cana-de-açúcar, com mais de 8,0 milhões de hectares plantados e a maior produção entre as comodities nacionais (FAOSTAT, 2022; CONAB, 2024). As regiões Sudeste e Centro-oeste lideram a produção de cana-de-açúcar, com 86 % da produção nacional (614 milhões de toneladas de colmo), na safra 2023/2024. O Nordeste ocupa a terceira posição, com a maior contribuição dos Estados de Alagoas, Pernambuco e Paraíba. A estimativa de crescimento médio da produtividade regional é de 1,0 %, na safra 2024/2025 (CONAB, 2024).

A cana-de-açúcar é o recurso renovável de maior representatividade na matriz energética nacional, que é 39 % renovável. A cultura corresponde a 52 % da bioenergia, 35 % da energia renovável e 14 % de toda energia produzida no país (BRASIL, 2024). A produção nacional contribui com cerca de 35 % do etanol mundial (BUDEGUER et al., 2021; KARP et al., 2021). A Política Nacional de Biocombustíveis – RenovaBio foi implantada no Brasil para incentivar o uso de tecnologias que promovam sustentabilidade da produção da cana-de-açúcar, com

aumento da produção sem expansão da área de cultivo. Essa política tem como foco a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) no agroecossistema, que se originam principalmente do fertilizante nitrogenado (GRASSI; PEREIRA, 2019).

A adubação nitrogenada é uma das práticas que mais comprometem a sustentabilidade da cultura devido ao potencial de emissão de GEE e baixo aproveitamento do N do fertilizante pela planta (CASSIM et al., 2024). A busca por estratégias que promovam a nutrição adequada da cultura e que aumentem o aproveitamento do N-fertilizante nos canaviais brasileiros, é importante para a evolução da cultura nos âmbitos econômico e ambiental (CASTRO et al., 2023a; 2024; PEREIRA et al., 2021).

2.2. Adubação nitrogenada na cultura da cana-de-açúcar

O nitrogênio (N) é o segundo nutriente mais exigido pela cana-de-açúcar, e o mais correlacionado com a produção de biomassa aérea da cultura (OLIVEIRA et al., 2010). Em campo, a omissão de N pode comprometer em mais de 30 % a produtividade de colmos e de açúcar (KHÖLLN et al., 2021; ZENG et al., 2020; BOSCHIERO et al., 2020). De forma natural, as plantas são supridas com N por meio da matéria orgânica do solo (M.O.S.), fixação biológica de nitrogênio (FBN) e deposição atmosférica. Essas fontes têm contribuição variável e insuficiente para a nutrição adequada da cultura, em função das condições edafoclimáticas e oscilações ambientais no ciclo (CASSIM et al., 2024; PEREIRA et al., 2021; ZHANG et al., 2018).

Uma vez no solo, o N tem ciclo dinâmico e complexo de transformações e perdas, que podem resultar na redução da disponibilidade às plantas. A intensidade desses processos depende das características edafoclimáticas e do manejo do fertilizante (ZENG et al., 2020; WANG et al., 2019). No Brasil, a expansão das áreas de cultivo da cana-de-açúcar em solos arenosos, com baixa reserva orgânica, aumenta a necessidade do manejo do N-fertilizante para obtenção de produção satisfatória e longevidade aos canaviais (DONAGEMMA et al., 2016; KHÖLLN et al., 2021; MARIANO et al., 2017; ZHAO, GLAZ; COMSTOCK, 2014).

Métodos isotópicos têm identificado que maior contribuição do N da planta não é proveniente do fertilizante (GAVA et al., 2019; PEREIRA et al., 2021; SILVA et al., 2024), o que mantém os estudos relacionados ao manejo mais eficiente do fertilizante nitrogenado em contínua atualização (CASTRO et al., 2023a; 2024; TENELLI et al., 2021; YANG et al., 2019). O manejo de fontes nitrogenadas não melhora a performance no fertilizante no campo, como foi verificado por Silva et al. (2024), já o ajuste de dose e variedades aumentam o potencial de

retorno econômico do investimento na adubação (CASTRO et al., 2024; SILVA et al., 2024; YANG et al., 2019).

No Nordeste do Brasil, o aumento da disponibilidade de N para a planta foi alcançado por meio da suplementação da dose do fertilizante nitrogenado com mais uma operação de adubação (SILVA et al., 2024), no entanto, o aumento da quantidade de N utilizada no ciclo não aumentou a eficiência de uso do fertilizante, de forma que essa prática contrapõe a busca pela sustentabilidade da produção (BOSCHIERO et al., 2020; ZENG et al., 2020).

O aumento do rendimento da cultura sem aumento da dose de N-fertilizante tem sido alcançado pela combinação do N-fertilizante com outros insumos ou tecnologias, como micronutrientes, elementos benéficos e micro-organismos promotores do crescimento de plantas (FARIAS-RAMÍREZ et al., 2024; LIMA et al., 2022; SANTOS et al., 2019). No contexto crescente de agricultura regenerativa, o consórcio e/ou rotação de culturas nos canaviais visam progressivamente reduzir a dependência do N-fertilizante com o aumento do estoque de M.O.S. (TENELLI et al., 2021).

O aumento da eficiência de uso do fertilizante pode ser obtido com a adubação foliar de forma complementar à adubação de solo. O N aplicado via foliar não é exposto às interações e perdas que ocorrem no solo, de forma que mais de 60 % do fertilizante nitrogenado é absorvido pela planta (CASTRO et al., 2023; DEUNER et al., 2008). Essa técnica pode ser combinada com outras formas de manejo do N, além de possibilizar embarcar outros insumos dos tratos culturais (como defensivos e bioestimulantes), otimizando as operações agrícolas (LEITE et al., 2020; NIU et al., 2021).

A pulverização foliar permite o fornecimento dos nutrientes em fases mais avançadas da cultura, quando há maior demanda do nutriente. Quando parte da dose total é aplicada via foliar, há aumento da recuperação do fertilizante aplicado no ciclo, e o aumento da disponibilidade de N na planta promove ganho em biomassa, sem a necessidade de aumento do consumo de N-fertilizante no ciclo (ANDRADE et al., 2024; CASTRO et al., 2023b).

2.3. Adubação foliar e vias de absorção de nutrientes

A capacidade das folhas absorverem solutos é herança da vida primitiva dos vegetais na água, de onde as plantas obtinham os nutrientes de que necessitavam. As plantas passaram a habitar também o ambiente terrestre e precisaram de adaptações, como especialização e alterações anatômicas e morfológica dos tecidos. A raiz se tornou especializada na aquisição de nutrientes e água, agora retirados do solo. A folha, o centro de trocas gasosas e produção de fotoassimilados, desenvolveu estratégias de regulação do fluxo de água. Essas adaptações são

também observadas em plantas de diferentes ambientes, e que estão sujeitas às oscilações ambientais (HAN et al., 2021; LIU, ZHENG; QI, 2020).

Na agricultura, a pulverização de calda nutritiva sobre a massa foliar das plantas consiste na adubação foliar. É utilizada de forma estratégica no manejo de culturas para complementação nutricional quando o solo ou ambiente apresentam restrições. Pode ser combinada com outras práticas, como aplicação de defensivos e de estimulantes de crescimento, e para estímulos em fases específicas do desenvolvimento (CERQUEIRA et al., 2019; NIU et al., 2021; RAFIULLAH et al., 2021).

Após a pulverização, a absorção dos íons presentes na gota depositada sobre a folha depende de fatores relacionados à planta, à calda e ao ambiente (FERNÁNDEZ; GIL-PELEGRÍN; EICHERT, 2020). No que se refere ao ambiente, a temperatura, umidade e luminosidade devem ser consideradas para manutenção da hidratação da gota (FERNÁNDEZ; PIMENTEL; BAHAMONDE, 2020) e da atividade fotossintética (CERQUEIRA et al., 2019). A calda reúne diferentes solutos e pode variar quanto à concentração, a depender do veículo de aplicação (pulverizador terrestre, avião, helicóptero ou drone). A adição de adjuvantes é necessária para garantir propriedades físico-químicas adequadas, tais como dispersão, hidratação, adesão e pH. As fontes fertilizantes também podem interferir nessas propriedades, uma vez que os nutrientes podem ser fornecidos na forma de sais de sulfato, nitrato, cloreto e carbonato, além de formulações com complexantes, e que apresentam diferentes interações ou reações em solução. Essas propriedades estão diretamente relacionadas com a eficiência da adubação foliar, atuando na velocidade de absorção e redução dos danos à folha (BAHAMONDE et al., 2023; FERNÁNDEZ; BROWN, 2013; FERNÁNDEZ; GIL-PELEGRÍN; EICHERT, 2020; FERNÁNDEZ; PIMENTEL; BAHAMONDE, 2020; NIU et al., 2021).

Na superfície da folha, a gota está em contato com a cutícula, a camada externa que regula o fluxo de água, íons e moléculas, entre o ambiente externo e o interior da planta. A composição básica da cutícula apresenta cutina, cera e polissacarídeos, distribuídos em diferentes proporções ao longo do perfil cuticular, formando camadas. A camada mais externa/superficial é mais porosa/permeável. A porção mais interna é menos permeável, se assemelhando à parede celular da epiderme subjacente (FERNÁNDEZ et al., 2017). A presença de estômatos e tricomas também interferem na permeabilidade da cutícula. Enquanto os estômatos parecem não contribuir para absorção foliar, os tricomas aumentam a taxa de absorção da solução pulverizada (CASTRO et al., 2023b; FERNÁNDEZ et al., 2024; OLIVEIRA et al., 2024).

A espessura e composição da cutícula dirigem a difusão da gota via cutícula, e são fatores que variam em função do genótipo, contexto ambiental, idade e sanidade da planta (FERNÁNDEZ et al., 2024; CHEN et al., 2020; HENNINGSEN et al., 2023). Plantas em condição de estresse, biótico ou abiótico, têm menor absorção foliar. O estresse hídrico e a deficiência nutricional promovem alterações anatômicas e metabólicas, tais como espessamento e desidratação da cutícula, aumento da deposição de cera, e espessamento da parede celular. Nessas condições a calda pulverizada via folha tem menor taxa de absorção (FERNANDEZ et al., 2017; CHEN et al., 2020; TARATIMA et al., 2020).

A difusão dos íons através da cutícula, chegando até a parede celular, espaços intercelulares e lamela média, consiste no transporte via apoplasto. Ao chegar na membrana plasmática, os íons são transportados através da membrana para o interior da célula, quando de fato são absorvidos e podem ser utilizados no metabolismo celular. Uma vez dentro da célula, os íons podem ser transportados de uma célula para outra (via simplasto), por meio de transportadores de membrana ou por conexões do citoplasma entre células adjacentes (plasmodesmos) (GÖRLACH et al., 2021).

O transporte dos íons através da membrana pode ocorrer por processo passivo ou ativo. O processo passivo, também chamado de espontâneo, ocorre a favor do gradiente de concentração, utilizando transportadores do tipo canal e carregadores. Já o processo ativo ocorre contra o gradiente de concentração, por meio de transportadores do tipo bomba, que são ativados com consumo extra de energia da célula (TAIZ et al., 2017).

Os transportadores, por sua vez, são modulados pelo metabolismo, de forma que o fluxo de íons para dentro da célula depende da demanda nutricional e da atividade metabólica plena do tecido. As pulverizações foliares em fases de maior demanda nutricional em plantas sadias apresentam os melhores resultados, porque a taxa de absorção é maior (FERNÁNDEZ; BROWN, 2013; HENNINGSEN et al., 2023).

A ureia é uma molécula apolar, cuja interação com a cutícula modifica a conformação inicial dos seus constituintes, e difunde por canais/poros aquosos que atravessam a cutícula (CASTRO et al., 2023b; FERNÁNDEZ et al., 2017). Na membrana plasmática, a ureia é transportada por difusão facilitada, via de baixa especificidade, maior taxa de fluxo de íons, e que ocorre a favor do gradiente eletroquímico. Esse tipo de transporte pode ser mediado por proteínas do tipo canal e do tipo carregadores. Devido à baixa especificidade desses processos passivos, outros íons também sejam conduzidos junto com a ureia para dentro da célula. O transporte da ureia também pode ocorrer por meio do transporte ativo secundário, em que um outro íon pode ser transportado ativamente no mesmo carregador, ao mesmo tempo (TAIZ et

al., 2017; WITTE, 2011). Os elementos nutrientes são absorvidos na forma de íons que interagem com a cutícula de forma diferente e mais lenta em comparação com a ureia. Como as vias de absorção da ureia possibilitam transportar outros íons, adicionar ureia à calda de pulverização pode acelerar a absorção dos outros íons (LI; LIU, 2015).

Já o deslocamento do íon aplicado nas folhas para outras partes da planta, como raízes e folhas novas (que não receberam a pulverização foliar) irá depender da mobilidade do soluto via floema (FERNÁNDEZ; BROWN, 2013). De modo geral, os micronutrientes apresentam baixa mobilidade via floema, fazendo com que o efeito da pulverização foliar seja limitado às folhas que receberam aplicação. E a continuação do estímulo da pulverização foliar irá depender da disponibilidade no solo ou de novas pulverizações (FERNÁNDEZ; BROWN, 2013; GÖRLACH et al., 2021). No caso de nutrientes considerados móveis no floema, como N, P e Ni, o estímulo pode continuar ocorrendo em outras partes da planta, como raiz, caule e novas brotações (CASTRO et al., 2023b; GÖRLACH et al., 2021; OLIVEIRA; LAVRES; VAN DER ENT, 2021).

2.4. Adubação foliar com ureia para eficiência de uso do N-fertilizante

A ureia é a principal fonte utilizada na adubação nitrogenada foliar por ser a mais concentrada em N, e por apresentar maior condutância cuticular, em relação às fontes amoniacal e nítrica (USCOLA et al., 2014). O tempo de absorção de toda ureia aplicada via foliar pode levar até 10 dias, e com uso de adjuvantes a absorção pode ser mais rápida (CASTRO et al., 2023b). Segundo Trivelin et al. (1988), a maior parte da ureia é absorvida nas primeiras 48 horas, o que reduz a suscetibilidade às perdas por chuva eventual, ou por volatilização do N da gota, caso ocorra degradação da ureia ainda na superfície da folha.

Doses altas de ureia via folha podem resultar em danos ao tecido foliar, com clorose evoluindo para necrose, devido ao acúmulo de ureia na célula. A toxidez também pode ser provocada pelo excesso de amônio, oriundo da degradação da ureia ainda na superfície foliar ou no interior da célula (CASTRO et al., 2022; 2023b). Fertilizantes especiais de liberação lenta, como ureia-formaldeído, podem ser utilizados para minimizar os danos, mas a estabilidade da reação e os resultados em produção ainda estão sendo discutidos (CASSIM et al., 2020; SALTHAMMER; GUNSCHERA, 2021).

Após a absorção pela folha, o N da ureia é distribuído para outros tecidos da planta. Na cana-de-açúcar, o transporte do ^{15}N-ureia pulverizado nas folhas para as raízes ocorreu em 06 horas no estudo de Trivelin et al. (1988). Uma vez na raiz, o N estimula o crescimento radicular

e o maior aproveitamento dos nutrientes do solo, o que também contribui para o crescimento da parte aérea e para a formação da reserva energética da socaria subsequente (NIU et al., 2021).

Na cana-de-açúcar, a adubação nitrogenada via solo tem aproveitamento médio de 18 %, independente da fonte utilizada (ANDRADE et al., 2024; FRANCO et al., 2011; SILVA et al., 2024). Na adubação convencional, todo o nutriente é fornecido até os 90 dias do plantio ou corte, com doses mais altas que a necessidade dos estádios iniciais do desenvolvimento. Aos 140 ou 150 dias, na fase de intenso crescimento da parte aérea, a demanda por N é alta e a disponibilidade de N é baixa devido às transformações e perdas do N-fertilizante fornecido via solo no início do ciclo (WANDERLEY et al., 2021).

Na fase de maior demanda, a adubação via solo não é viável devido ao porte alto da planta, e a pulverização foliar pode ser uma estratégia para aumentar a disponibilidade do nutriente às plantas. A ureia aplicada via foliar tem recuperação superior a 60 % (CASTRO et al., 2023b; TRIVELIN et al., 1988; LEITE et al., 2020), possibilitando o aumento do teor de N e, consequentemente, da conversão do fertilizante em biomassa (ANDRADE et al., 2024; CERQUEIRA et al., 2019; DEUNER et al., 2008; LUO et al., 2015; SUBHANULLAH; RAHMAN, 2017).

O fornecimento de nutrientes limitantes via folha estimula o metabolismo da planta, o que resulta no melhor aproveitamento de recursos do solo (NIU et al., 2021). Em relação ao N, a pulverização foliar complementar à adubação no solo pode ser utilizada como estratégia de redução da dose de N no solo. A complementação de N realizada via folha na fase pode reduzir significativamente as perdas de N no agroecossistema, além de possibilitar a redução da dose de N no ciclo, e assim obter maior eficiência da adubação nitrogenada (ANDRADE et al., 2024).

2.5. Níquel como nutriente de plantas e seu papel no metabolismo de nitrogênio

O níquel (Ni) é o elemento mais recentemente inserido na lista de nutrientes. A primeira função do Ni documentada foi ativação da enzima urease, e mais recentemente, seu papel na defesa vegetal (ESKEW; WELCH; CARY, 1983; FABIANO et al., 2015). Atualmente, são conhecidas nove Ni-enzimas em plantas e/ou micro-organismos: urease, hidrogenase, glioxalase I, carbono-monóxido de carbono desidrogenase, peptídeo-deformilase, acetil-S-coenzima A sintetase, metil-coenzima M redutase, e Ni-superóxido dismutase (SHAHZAD et al., 2018).

O Ni é absorvido na forma de Ni^{2+} pelas raízes e pelas folhas, com atividade biológica de ativação enzimática em diferentes estados redox (ALFANO; CAVAZZA, 2020). Apresenta

mobilidade via floema na forma complexada com aminoácidos ou proteínas, o que possibilita que seja acumulando em partes novas das raízes e parte aérea. Quando em excesso, o Ni inativa outras enzimas, e por isso, é deslocado dentro da célula também na forma complexada (YUSUF et al., 2011; KUTMAN; KUTMAN; CAKMAK, 2014).

O fornecimento de Ni em ambientes onde ele antes era negligenciado estimula processos metabólicos e atributos de produção. Mesmo em doses baixas, o Ni estimula o metabolismo de N, eficiência fotossintética, defesa vegetal, produção de biomassa, produção de grãos, e fixação biológica de nitrogênio (ALIBAKHSHI; KHOSHGOFTARMANESH, 2015; BARCELOS et al., 2017; 2018; FREITAS et al., 2018; 2019; GERENDÁS; ZHU; SATTELMACHER, 1998; HOSSEINI; KHOSHGOFTARMANESH, 2013; LAVRES et al., 2016; RAMPAZZO et al., 2022). Isso indica deficiência oculta desse micronutriente, quando há limitações metabólicas mesmo na ausência de sintomas visuais.

Concentrações elevadas de Ni no tecido promovem redução do desenvolvimento radicular e da parte aérea, inibição da absorção nutrientes, estresse oxidativo, degradação de clorofilas, e redução da condutividade estomática (SREEKANTH et al., 2013; SHAHZAD et al., 2018). Tais sintomas ocorrem em plantas com teor foliar acima de 10 mg kg^{-1} de Ni. A depender da cultura e variedade, a toxidez pode ocorrer com teor inferior a 3,0 mg kg^{-1} de Ni, com alterações fisiológicas e morfológicas (FREITAS et al., 2019; JAIN; SHRIVASTAVA; SHRIVASTAVA, 2009; RIZWAN et al., 2022; SHAHZAD et al., 2018).

Na cana-de-açúcar, os teores foliares variam de 0,24 a 2,78 mg kg^{-1} de Ni em plantas sadias (BEZERRA, 2018; CAMELOTTI et al., 2007; MORETTI et al., 2016; NOGUEIRA et al., 2013). Em solo de baixa fertilidade com cultivos sucessivos de cana-de-açúcar no litoral da Paraíba, onde não houve fornecimento de Ni, Bezerra (2018) identificou potencial de resposta à adubação com Ni. A necessidade de reposição desse nutriente para a nutrição adequada da cultura foi confirmada por Camelotti et al. (2007; 2009), que verificaram redução do teor de Ni nos tecidos da cana-de-açúcar após exportações dos ciclos sucessivos.

As funções mais estudas no Ni entre as culturas são ligadas à ativação das enzimas urease, hidrogenase, glioxalase I. A hidrogenase é uma enzima associada ao processo de fixação biológica de nitrogênio (FBN), e atua recuperando prótons para a reação, reduzindo o custo energético da redução do N_2 atmosférico. Essa é uma reação importante para aumentar a eficiência da FBN e redução do custo da reação tanto para a célula microbiana quanto para o bacterióide de leguminosas. A glioxalase I degrada o metilglioxal acumulado em condições de estresse, reduzindo o estresse oxidativo na célula (FABIANO et al., 2015; TSANG; WONG, 2022).

A urease das plantas apresenta estrutura quaternária formada por seis unidades funcionais, constituídas por único tipo de peptídeo. Nesse complexo existem três centros reativos, que contém dois átomos de Ni^{2+}. A principal função da urease está ligada à sua atividade catalítica, acelerando reações de transformação de um substrato. Outras funções não catalíticas da urease são também importantes, como a sinalização para associação com bactérias diazotróficas, e defesa, agindo como inseticida e fungicida (KAPPAUN et al., 2018).

No metabolismo de N, essa enzima atua na reciclagem no N armazenado, liberando-o da molécula de ureia (MAZZEI; MUSIANI; CIURLI, 2020). A ureia é derivada da arginina, aminoácido de reserva com maior concentração de N, formado após a degradação de proteínas. Quando a célula demanda por N, a arginase mitocondrial atua sobre a arginina, liberando ornitina e ureia. Enquanto a ornitina segue rotas paralelas de transporte e armazenamento de N, formando compostos não proteicos, a ureia é transportada para o citosol para dar início a formação de proteínas (SIDDAPPA; MATATHE, 2020). A ureia também pode ser liberada na degradação de ureídeos em leguminosas, para o transporte de N derivado da FBN (WINTER et al., 2015; POLACO; MAZZAFERA; TEZOTTO, 2013).

No citosol, a ureia é hidrolisada por ação da urease, liberando amônia (NH_3) e ácido carbâmico (CH_3NO_2). De forma espontânea, o ácido carbâmico (instável) é hidrolisado, liberando dióxido de carbono (CO_2) e outra amônia (MAZZEI; MUSIANI; CIURLI, 2020). Essa reação também ocorre no solo, pela ação da urease microbiana e da urease extracelular (CARLINI; LIGABUE-BRAUN, 2016). No solo ou no citosol, a amônia é protonada, formando o íon amônio (NH_4^+). Nessa forma, o N pode ser assimilado em aminoácidos livres, e o CO_2 é utilizado na síntese de fotoassimilados (WITTE, 2011).

A assimilação de NH_4^+ oriundo da ureia ocorre por meio da atividade da enzima glutamina sintetase (GS) para síntese do aminoácido primário glutamina. Essa enzima apresenta a maior afinidade com amônio, evitando, assim, o acúmulo deletério de amônio na célula. A partir da glutamina, as enzimas glutamato sintase (GOGAT) e asparagina sintetase produzem o aminoácido glutamato, que também pode ser formado pela ação da enzima glutamato desidrogenase (GDH), a partir do α-cetoglutarato. A síntese de todos os demais aminoácidos essenciais é conectada com a glutamina ou glutamato, por meio de transaminações realizadas por aminotransferases, que realizam a substituição de radicais, de acordo com a necessidade da célula. O glutamato pode ainda ser precursor da glutamina, ou pode ser utilizado para sintetizar compostos nitrogenados não proteicos, como poliaminas e hormônios (MAJUMDAR et al., 2016; PRATELLI; PILOT, 2014; SCHERTL et al., 2014; YANG et al., 2019).

No metabolismo natural das plantas, a urease apresenta baixa atividade, sendo requerida em fases de brotação/germinação de brotos e sementes, e para a reciclagem de N das moléculas de reserva, que ocorre na mudança de estádios fenológicos, em condições de estresse nutricional e em tecidos senescentes para mobilização de reservas (SIDDAPPA; MATATHE, 2020). Plantas leguminosas, como soja e feijão, apresentam um segundo tipo de urease, acumulada nos grãos, com nível de atividade mais alto do que a da urease distribuída nos demais tecidos da planta. Durante a germinação, há intensa atividade metabólica e demanda pelo N armazenado, requerendo alta atividade da urease das sementes e da arginase (SIDDAPPA; MATATHE, 2020; WINTER et al., 2015). Isso explica a maior demanda por Ni nesse grupo de plantas (FREITAS et al., 2019), quando comparado a poaceas e hortaliças, por exemplo (ALIBAKHSHI; KHOSHGOFTARMANESH, 2015; LI et al., 2022; RAMPAZZO et al., 2022; RIZWAN et al., 2022).

Independente do grupo botânico, a adição de Ni no manejo promove aumento das reações e produtos do metabolismo de N, principalmente do ciclo da ureia e ornitina (FABIANO, 2019; FREITAS et al., 2019; BARCELOS et al., 2017). O estímulo metabólico é também observado no metabolismo antiestresse (BARCELOS et al., 2018; RAMPAZZO et al., 2022).

Os produtos da hidrólise da ureia, NH_4^+ e CO_2, são a base para a produção de aminoácidos e açúcares, que por sua vez, controlam o metabolismo de N e de carbono na planta, e essas duas rotas bioquímicas regulam a produção de biomassa. Para isso, o teor de Ni da planta deve atender a demanda da atividade da urease (KUTMAN; KUTMAN; CAKMAK, 2013a; LAVRES et al., 2016).

Plantas deficientes em Ni podem apresentar acúmulo deletério de ureia, cujo sintoma é expresso como manchas cloróticas e necróticas (POLACO; MAZZAFERA; TEZOTTO, 2013). Isso é visualizado em plantas nutridas apenas com ureia durante todo o ciclo (GERENDÁS; SATTELMACHER, 1997; 1998), e em plantas que recebem ureia via folha (KUTMAN; KUTMAN; CAKMAK, 2013a; 2014).

Quando aplicado no solo, o Ni intensifica a atividade da urease do solo, o que pode resultar em perdas relevantes do N-ureia por meio da volatilização da NH_3 (MISKOWIEC; OLECH, 2020). Essas perdas podem ocorrer independente do estímulo da aplicação de Ni, e algumas estratégias de redução podem ser adotadas (CANTARELLA et al, 2018). O fornecimento de ureia e Ni na calda de pulverização foliar reduz o potencial de perda do N, uma vez que as interações e os processos de perda serão amenizados ou eliminados.

2.6. Adubação foliar com ureia e níquel para aumento do aproveitamento da ureia exógena

Além da ureia endógena, a planta é capaz de absorver e metabolizar a ureia fornecida via adubação, tanto pelas raízes quanto pelos órgãos aéreos (POLACO; MAZZAFERA; TEZOTTO, 2013). A ureia aplicada na folha apresenta rápida difusão (TRIVELIN et al., 1989; Castro et al., 2023b), no entanto, pode gerar danos descritos para acúmulo de ureia e amônio: necrose no ápice da folha, seguindo o fluxo transpiratório do tecido (CASTRO et al., 2022; KUTMAN; KUTMAN; CAKMAK, 2013a). Em poaceas ainda se discute se o efeito de danos foliares se dá pelo acúmulo de ureia ou de amônio, uma vez que os danos ocorrem mesmo em plantas que recebem outras fontes de N foliar (CASTRO et al. 2022). O fornecimento de ureia foliar aumenta atividade da urease e, consequentemente, os teores de amônio aumentam. O fluxo da ureia para dentro da célula dura alguns dias, de forma que tanto a ureia quanto o amônio podem ser acumulados após a pulverização foliar de ureia (CASTRO et al., 2022; 2023b).

Após a hidrólise da ureia, o amônio liberado é assimilado pela glutamato sintetase (GS), para formação de glutamina, no citosol. A glutamina é utilizada pela glutamato sintase (GOGAT) para síntese de glutamato, havendo equilíbrio entre produção e consumo de prótons. Na presença de amônio, a atividade da GS é mais rápida que a da GOGAT, e em condições de alta concentração, outra enzima passa a ter importância nesse processo, a GS2, no cloroplasto. A atividade dessa enzima libera dois prótons no meio, oriundos do ATP e do amônio, enquanto a GS1 libera apenas um. Nessa condição, a síntese de glutamina supera a síntese de glutamato, e os prótons produto da reação são acumulados, causando estresse ácido na célula. Essa condição, ativa genes relacionados ao estresse ácido, e assim, o crescimento da planta é comprometido (CASTRO et al., 2022; 2023b; HACHIYA et al., 2021).

Entre os processos que são sugeridos para explicar o estresse causado pelo amônio, o estresse oxidativo e comprometimento do aparato fotossintético são os mais citados. As reações que ocorrem e a tolerância das plantas parecem ser variáveis de acordo com o grupo vegetal e com a concentração “crítica” amônio (ESTEBAN et al., 2016). Na cultura do trigo, Castro et al. (2022) sugeriram que a GS2 seja inibida ou que a GS1 seja estimulada para redução do estresse ácido. A adição de nitrato pode ser uma alternativa, cuja assimilação consome prótons e reduz a acidificação do meio (ESTEBAN et al., 2016; HACHIYA et al., 2021). Na cana-de-açúcar, o melhor desempenho vegetativo foi obtido pela combinação de nitrato+amônio como fonte de N, com predomínio de nitrato (BOSCHIERO et al., 2019)

O adequado suprimento foliar de Ni pode garantir maior aproveitamento do N-ureia pela planta (KUTMAN; KUTMAN; CAKMAK, 2013a; 2014). Nesse contexto, a adição de Ni junto

com a ureia pode melhorar a nutrição e desempenho das plantas, principalmente pelo estímulo ao metabolismo de N (ALIBAKHSHI; KHOSHGOFTARMANESH, 2015; FABIANO, 2019; BRUNO et al., 2019).

O fornecimento de Ni via folha requer criteriosa definição da dose, uma vez que os teores ótimos para as culturas são baixos e pouco estudados, e o excesso de Ni pode causar toxidez e inibição do metabolismo de N (RIZWAN et al., 2022; SHAHZAD et al., 2018). Embora a literatura reúna informações sobre a calibração de Ni para a cultura da soja (BARCELOS et al., 2018; FREITAS et al., 2019, RODAK et al., 2024), os estudos com outras culturas são ainda incipientes quanto à nutrição com Ni. A maior parte dos trabalhos com Ni em poaceas avaliam a toxidez do elemento (MORETTI et al., 2016; NOGUEIRA et al., 2013).

A maioria dos estudos com Ni foram realizados em casa de vegetação, avaliando estágios iniciais do crescimento da planta, como germinação de sementes e crescimento de mudas (BRUNO et al., 2019; MORAES et al., 2009; JAIN; SHRIVASTAVA; SHRIVASTAVA, 2009; LI et al., 2022; RAMPAZZO et al., 2022; RIZWAN et al., 2022; UĞURLAR, 2024; ZHANG et al., 2022). Ainda poucos estudos mostraram o potencial do Ni em estimular estádios mais avançados do ciclo das culturas em culturas de ciclo longo (ALIBAKHSHI; KHOSHGOFTARMANESH, 2015; FABIANO, 2019; GERENDÁS; SATTELMACHER, 1997; 1998; KUTMAN; KUTMAN; CAKMAK, 2013a; 2013b), inclusive em condições de campo (BARCELOS et al., 2017; 2018). Esses estudos serão importantes para avaliação do potencial de resposta em fases de pleno crescimento, bem como compreender os efeitos negativos da aplicação em fase reprodutiva (KOCHENBORGER et al., 2023).

O Ni também estimula o metabolismo de N de plantas não leguminosas, supridas com ureia ou outras fontes de N devido ao seu papel como modulador do metabolismo de nitrogênio. Na presença de Ni há aumento da síntese e atividade da urease, GS, GOGAT e GDH, superando a atividade de plantas sem Ni (LI et al., 2022). Esse processo de estímulo não é completamente compreendido, mas envolve a expressão de genes de moléculas transportadoras e alteração da permeabilidade e seletividade das membranas, bem como a inibição de outros genes com ação oposta (DINKELOO; BOYD; PILOT, 2018; FABIANO, 2019; OLIVEIRA et al, 2001).

O Ni estimula a atividade de enzimas de assimilação de nitrato e amônio, bem como o aumento de aminoácidos libres envolvido na síntese de outros aminoácidos e proteínas, mesmo quando a atividade da urease não é modificada (LI et al., 2022; MORAES et al., 2009; ZHANG et al., 2022). Plantas com baixo suprimento de N apresentam inibição das rotas de assimilação de N, com baixa atividade das enzimas redutase do nitrato, GS, GOGAT e GDH. A adição de Ni no manejo nutricional, a atividade das enzimas retoma níveis satisfatórios de atividade,

modificando também o metabolismo de carboidratos com aumento da produção de açúcares (glicose, frutose, sacarose) (LI et al., 2022; ZHANG et al., 2022). O Ni também estimula rotas de síntese de aminoácidos não proteicos, envolvidos na síntese de poliaminas e GABA, e aminoácidos de armazenamento, cujas funções estão relacionadas ao metabolismo de N, carbono, crescimento e amenização de estresse na célula (FABIANO, 2019; MAJUMDAR et al., 2016).

A combinação de Ni com suprimento adequado de N também aumenta o nível de atividade do metabolismo de N (LI et al., 2022; ZHANG et al., 2022). O aumento da expressão genética de urease com a combinação de ureia+Ni foi verificado por Fabiano (2019), em que a expressão da combinação superou a aplicação isolada desses nutrientes. Nesse estudo, além de estimular a rota de assimilação de aminoácidos protéicos, ureia+Ni aumentou a expressão de enzimas e aminoácidos não protéicos. A adição de ureia sem Ni preservou os aminoácidos de reserva de N (evitou o consumo do N armazenado), estimulou a formação de proteínas e não atuou sobre a rota das poliaminas (redução de estresse). Isso indica que o Ni estimula o metabolismo de forma mais ampla, o que colabora para a redistribuição do N e crescimento.

Em aplicações foliares de ureia, quando a quantidade de ureia da folha aumenta rapidamente, a disponibilização adequada de Ni pode minimizar a ocorrência de danos cloróticos (KUTMAN; KUTMAN; CAKMAK, 2013a), o que pode possibilitar o aumento da dose de ureia via folha, de forma complementar à adubação via solo. Essa abordagem se torna uma estratégia de aumento da recuperação da adubação nitrogenada e o melhor aproveitamento do fertilizante ureia no ciclo (SILVA et al., 2024). Esses estímulos resultam no aumento da produção de biomassa, mobilização de reservas de N e nutrição adequada da planta (ALIBAKHSHI; KHOSHGOFTARMANESH, 2015), o que pode resultar aumento do rendimento agrícola.

No contexto de produção de cana-de-açúcar, esse manejo tem potencial de aumentar o suprimento de N para planta ao mesmo tempo em que pode reduzir a quantidade de N utilizada no ciclo. Isso implica na redução do custo financeiro e ambiental da produção. Essa proposta está alinhada com a atual demanda nacional e internacional por manejo sustentável para produção de alimentos e combustíveis. O manejo combinado da ureia e Ni via foliar pode promover aumento do rendimento agrícola, da nutrição e, consequentemente, da longevidade do canavial, com menos perdas de N no sistema agrícola.

Referências Bibliográficas

ALFANO, M.; CAVAZZA, C. Structure, function, and biosynthesis of nickel-dependent enzymes. **Protein Science**, v. 29, n. 5, p. 1071-1089, 2020. https://doi.org/10.1002/pro.3836

ALIBAKHSHI, M.; KHOSHGOFTARMANESH, A. H. Effects of nickel nutrition in the mineral form and complexed with histidine in the nitrogen metabolism of onion bulb. **Plant Growth Regulation**, v. 75, p. 733–740, 2015. https://doi.org/10.1007/s10725-014-9975-z

ANDRADE, J. J.; OLIVEIRA, E. C. A.; LIMA, A. M. S.; AMORIM, G. P. S.; OLIVEIRA, E. S.; FREIRE, F. J.; ADELINO, W. S. M.; OLIVEIRA FILHO, E. C. Foliar fertilization improves the nitrogen nutrition of sugarcane. **Agriculture**, v. 14, n. 11, p. 1-12, 2024. https://doi.org/10.3390/agriculture14111984

BAHAMONDE, H. A.; PIMENTEL, C.; LARA, L. A.; BAHAMONDE-FERNÁNDEZ, V.; FERNÁNDEZ, V. Foliar application of potassium salts to olive, with focus on accompanying anions. **Plants**, v. 12, n. 3, p. 472, 2023. https://doi.org/10.3390/plants12030472

BARCELOS, J. P. Q.; OSORIO, C. R. W. S.; LEAL, A. J. F.; ALVES, C. Z.; SANTOS, E. F.; REIS, H. P. G.; REIS, A. R. Effects of foliar nickel (Ni) application on mineral nutrition status, urease activity and physiological quality of soybean seeds. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 2, p. 184-192, 2017. http://doi.org/10.21475/ajcs.17.11.02.p240

BARCELOS, J. P. Q.; REIS, H. P. G.; GODOY, C. V.; GRATÃO, P. L.; FURLANI JUNIOR, E.; PUTTI, F. F.; CAMPOS, M.; REIS, A. R. Impact of foliar nickel application on urease activity, antioxidant metabolism and control of powdery mildew (*Microsphaera diffusa*) in soybean plants. **Plant Pathology**, v. 67, n. 7, p. 1502-1513, 2018. http://doi.org/10.1111/ppa.12871

BEZERRA, N. S. **Métodos de diagnose nutricional da cana-de-açúcar fertirrigada na Paraíba**. 2018. 71f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) –Departamento de Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2018.

BORDONAL, R. O.; CARVALHO, J. L. N.; LAL, R.; FIGUEIREDO, E. B.; OLIVEIRA, B. G.; SCALA JR, N. L. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, v. 38, p. 1-23, 2018. http://doi:10.1007/s13593-018-0490-x

BOSCHIERO, B. N.; MARIANO, E.; AZEVEDO, R. A.; TRIVELIN, P. C. O. Influence of nitrate-ammonium ratio on the growth, nutrition, and metabolism of sugarcane. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 139, p. 246-255, 2019. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.03.024

BOSCHIERO, B. N.; MARIANO, E.; TORRES-DORANTE, L. O.; SATTOLO, T. M.; OTTO, R.; GARCIA, P. L.; DIAS, C. T. S.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen fertilizer effects on sugarcane growth, nutritional status, and productivity in tropical acid soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 117, p. 367-382, 2020. https://doi.org/10.1007/s10705-020-10074-w

BRASIL. Ministério de Minas e Energia – MME. Sistema de Informações Energéticas. Oferta e demanda de energia. Balanço energético. Matriz de balanço energético nacional 2023. Dados agregados. 1.1 Produção de energia primária. Disponível em: <https://www.mme.gov.br/SIEBRASIL/consultas/reporte-dinamico.aspx?or=30216&ss=2&v=1> Acessado em: novembro de 2024.

BRUNO, I. P.; MORAES, M. F.; DAMIN, V.; DOURADO-NETO, D.; REICHARDTM K. Does nickel influence leaf nitrogen uptake in coffee seedlings?. **Brazilian Journal of Agriculture**, v. 94, n. 3, p. 259-269, 2019. https://doi.org/10.37856/bja.v94i3.3609

BUDEGUER, F.; ENRIQUE, R.; PERERA, M. F.; RACEDO, J.; CASTAGNARO, A. P.; NOGUERA, A. S.; WELIN, B. Genetic transformation of sugarcane, current status and future prospects. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 768609, 2021. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.768609

CAMILOTTI, F.; ANDRIOLI, I.; MARQUES, M. O.; SILVA, A. R.; TASSO JUNIOR, L. C.; NOBILE, F. O. Avaliação dos teores de metais pesados no solo e na planta de cana-de-açúcar sob adubação com lodo de esgoto e vinhaça. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 25, p. 23-31, 2009.

CAMILOTTI, F.; MARQUES, M. O.; ANDRIOLI, I.; SILVA, A. R.; TASSO JUNIOR, L. C.; NOBILE, F. O. Acúmulo de metais pesados em cana-de-açúcar mediante a aplicação de lodo de esgoto e vinhaça. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 284-293, 2007. https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000100023

CANTARELLA, H.; OTTO, R.; SOARES, J. R.; SILVA, A. G. B. Agronomic efficiency of NBPT as a urease inhibitor: A review. **Journal of Advanced Research**, v. 13, p. 19-27, 2018. https://doi.org/10.1016/j.jare.2018.05.008

CARLINI, C. R.; LIGABUE-BRAUN, R. Ureases as multifunctional toxic proteins: A review. **Toxicon**, v. 110, p. 90-109, 2016.http://dx.doi.org/10.1016/j.toxicon.2015.11.020

CASSIM, B. M. A. R.; MACHADO, A. P. M.; FORTUNE, D.; MOREIRA, F. R.; ZAMPAR, E. J. O.; BATISTA, M. A. Effects of foliar application of urea and urea-formaldehyde/triazone on soybean and corn crops. **Agronomy**, v. 10, p. 1549, 2020. https://doi.org/10.3390/agronomy10101549.

CASSIM, B. M. A. R.; LISBOA, I. P.; BESEN, M. R.; OTTO, R.; CANTARELLA, H.; INOUE, T. T.; BATISTA, M. A. Nitrogen: from discovery, plant assimilation, sustainable usage to current enhanced efficiency fertilizers technologies–A review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 48, p. e0230037, 2024. https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20230037

CASTRO, S. A. Q.; KICHEY, T.; PERSSON, D. P.; SCHJOERRING, J. K. Leaf scorching following foliar fertilization of wheat with urea or urea–ammonium nitrate is caused by ammonium toxicity. **Agronomy**, v. 12, n. 6, p. 1405, 2022. https://doi.org/10.3390/agronomy12061405

CASTRO. S. G. Q.; COELHO, A. P.; CASTRO, S. A. Q.; CHIACHIA, T. R. S.; CASTRO, R. A.; LEMOS, L. B. Fertilizer source and application method influence sugarcane production and nutritional status. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1099589, 2023a. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1099589

CASTRO, S. A. Q.; SERMARINI, R. A.; ROSSI, M. L.; CASTRO, R. R. L.; TRIVELIN, P. C. O.; LINHARES, F. S. Optimizing foliar N-fertilization in sugarcane depends on plant genotype and nitrogen concentration. **Physiologia Plantarum**, v. 175, n. 6, p. 14085, 2023b. https://doi.org/10.1111/ppl.14085

CASTRO, S. G. Q.; COSTA, V. E.; CASTRO, S. A. Q.; CARVALHO, J. L. N.; BORGES, C. D.; CASTRO, R. A.; KÖLLN, O. T.; FRANCO, H. C. J. Fertilizer application method provides an environmental-friendly nitrogen management option for sugarcane. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, p. 1-14, 2024. https://doi.org/10.1007/s42729-024-01744-7

CERQUEIRA, G.; SANTOS, M. C.; MARCHIORI, P. E. R.; SILVEIRA, N. M.; MACHADO, E. C.; RIBEIRO, R. V. Leaf nitrogen supply improves sugarcane photosynthesis under low temperature. **Photosynthetica**, Praga, v. 57, n. 1, p. 18-26, 2019. https://doi.org/10.32615/ps.2019.033

CHEN, M.; ZHU, X.; ZHANG, Y.; DU, Z.; CHEN, X.; KONG, X.; SUN, W.; CHEN, C. Drought stress modify cuticle of tender tea leaf and mature leaf for transpiration barrier enhancement through common and distinct modes. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 6696, 2020. https://doi.org/10.1038/s41598-020-63683-4

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Portal de Informações Agropecuárias. Safras. Safra de cana-de-açúcar. Boletim – Cana-de-açúcar – 2º levantamento – 2024/25. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana> Acessado em: novembro de 2024.

DEUNER, S.; NASCIMENTO, R.; FERREIRA, L. S.; BADINELLI, P. G.; KERBER, R. S. Adubação foliar e via solo de nitrogênio em plantas de milho em fase inicial de desenvolvimento. **Ciências e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1359-1365, 2008. https://doi.org/10.1590/s1413-70542008000500001

DINKELOO, K.; BOYD, S.; PILOT, G. Update on amino acid transporter functions and on possible amino acid sensing mechanisms in plants. **Seminars in Cell and Developmental Biology**, v. 74, p. 105-113, 2018. https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2017.07.010

DONAGEMMA, G. K.; FREITAS, P. L.; BALIEIRO, F. C.; FONTANA, A.; SPERA, S. T.; LUMBRERAS, J. F.; VIANA, J. H. M.; ARAUJO FILHO, J. C.; SANTOS, F. C.; ALBUQUERQUE, M. R.; MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, P. C.; AMARAL, A. J.; BORTOLON, E.; BORTOLON, L. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p.1003-1020, 2016. https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900001

ESKEW, D. L.; WELCH, R. M.; CARY, E. E. Nickel: an essential micronutrient for legumes and possibly all higher plants. **Science**, v. 222, n. 4624, p. 621-623, 1983. https://doi.org/10.1126/science.222.4624.621

ESTEBAN, R.; ARIZ, I.; CRUZ, C.; MORAN, J. F. Review: Mechanisms of ammonium toxicity and the quest for tolerance. **Plant Science**, v. 248, p. 92-101, 2016. http://dx.doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.04.008

FABIANO, C. C.; TEZOTTO, T.; FAVARIN, J. L.; POLACCO, J. C.; MAZZAFERA, P. Essentiality of nickel in plants: a role in plant stresses. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, p. 754, 2015. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00754

FABIANO, C. C. **Urease na reciclagem de nitrogênio em plantas e o papel do níquel como micronutriente essencial.** 2019. 84f. Dissertação (Mestrado em Genética e Biologia Molecular) – Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019.

FAOSTAT - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Rankings. Sugar cane. 2022. Disponível em: https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/commodities_by_country
Acessado em: novembro de 2024

FARIAS-RAMÍREZ, A. J.; DUARTE, S. N.; MORENO-PIZANI, M. A.; COSTA, J. O.; BARROS, T. H. S.; COELHO, R. D. Combined effect of silicon and nitrogen doses applied to planting furrows on sugar, biomass and energy water productivity of sugarcane (*Saccharum* spp.). **Agricultural Water Management**, v. 296, p. 108796, 2024. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108796

FERNÁNDEZ, V.; ALMONTE, L.; BAHAMONDE, H. A.; GALINDO-BERNABEU, A.; SÁENZ-ARCE, G.; COLCHERO, J. Chemical and structural heterogeneity of olive leaves and their trichomes. **Communications Biology**, v. 7, n. 1, p. 352, 2024. https://doi.org/10.1038/s42003-024-06053-4

FERNÁNDEZ, V.; BAHAMONDE, H. A.; PEGUERO-PINA, J. J.; GIL-PELEGRÍN, E.; SANCHO-KNAPIK, D.; GIL, L.; GOLDBACH, H. E.; EICHERT, T. Physico-chemical properties of plant cuticles and their functional and ecological significance. **Journal of Experimental Botany**, v. 68, n. 19, p. 5293-5306, 2017. https://doi.org/10.1093/jxb/erx302

FERNÁNDEZ, V.; GIL-PELEGRÍN, E.; EICHERT, T. Foliar water and solute absorption: an update. **The Plant Journal**, v. 105, n. 4, p. 870-883, 2021. https://doi.org/10.1111/tpj.15090

FERNÁNDEZ, V.; BROWN, P. From plant surface to plant metabolism: the uncertain fate of foliar-applied nutrients. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 4, 2013. https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00289

FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; OLIVEIRA, E. A. C.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen in sugarcane derived from fertilizer under Brazilian field conditions. **Field Crops Research**, v. 121, n. 1, p. 29-41, 2011. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.11.011

FREITAS, D. S.; RODAK, B. W.; CARNEIRO, M. A.; GUILHERME, L. R. G. How does Ni fertilization affect a responsive soybean genotype? A dose study. **Plant and Soil**, v. 44, n. 1, p. 567-586, 2019. https://doi.org/10.1007/s11104-019-04146-2

FREITAS, D. S.; RODAK, B. W.; REIS, A. R.; REIS, F. B.; CARVALHO, T. S.; SCHULZE, J.; CARNEIRO, M. A. C.; GUILHERME, L. R. G. Hidden nickel deficiency? Nickel fertilization via soil improves nitrogen metabolism and grain yield in soybean genotypes. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 614, p. 1-16, 2018. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00614

GAVA, G. J. de C.; SCARPARE, F. V.; CANTARELLA, H.; KÖLLN, O. T.; RUIZ-CORRÊA, S. T.; ARLANCH, A. B.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen source contribution in sugarcane-inoculated plants with diazotrophic bacteria under urea-N fertigation management. **SugarTech**, v. 3, n. 21, p. 462-470, 2019. http://doi.org/10.1007/s12355-018-0614-2

GERENDÁS, J.; SATTELMACHER, B. Significance of N source (urea vs. NH4NO3) and Ni supply for growth, urease activity and nitrogen metabolism of zucchini (*Cucurbita pepo* convar. *giromontiina*). **Plant and Soil**, v. 196, p. 217-222, 1997. https://doi.org/10.1023/A:1004297807151

GERENDÁS, J.; ZHU, Z.; SATTELMACHER, B. Influence of N and Ni supply on nitrogen metabolism and urease activity in rice (*Oryza sativa* L.). **Journal of Experimental Botany**, v. 49, n. 326, p. 1545–1554, 1998. https://doi.org/10.1093/jxb/49.326.1545

GÖRLACH, B. M.; SAGERVANSHI, A.; HENNINGSEN, J. N.; PITANN, B.; MÜHLING, K. H. Uptake, subcellular distribution, and translocation of foliar-applied phosphorus: Short-term effects on ion relations in deficient young maize plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 166, p. 677-688, 2021. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.028

GRASSI, M. C. B.; PEREIRA, G. A. G. Energy-cane and RenovaBio: Brazilian vectors to boost the development of biofuels. **Industrial Crops and Products**, v. 129, p. 201-205, 2019. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.006

HACHIYA, T.; INABA, J.; WAKAZAKI, M.; SATO, M.; TOYOOKA, K.; MIYAGI, A; KAWAI-YAMADA, M.; SUGIURA, D.; NAKAGAWA, T.; KIBA, T.; GOJON, A.; SAKAKIBARA, H. Excessive ammonium assimilation by plastidic glutamine synthetase causes ammonium toxicity in *Arabidopsis thaliana*. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 4944, 2021. https://doi.org/10.1038/s41467-021-25238-7

HAN, S.; XING, Z.; JIANG, H.; LI, W.; HUANG, W. Biological adaptive mechanisms displayed by a freshwater plant to live in aquatic and terrestrial environments. **Environmental and Experimental Botany**, v. 191, p. 104623, 2021. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104623

HENNINGSEN, J. N.; GÖRLACH, B. M.; QUINTERO, J. M.; GARRIDO, R. R.; MÜHLING, K. H.; FERNÁNDEZ, V. Leaf wettability is the main driver for foliar P uptake in P-deficient maize. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 205, p. 108170, 2023. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108170

HOSSEINI, H.; KHOSHGOFTARMANESH, A. H. The effect of foliar application of nickel in the mineral form and urea-Ni complex on fresh weight and nitrogen metabolism of lettuce. **Scientia Horticulturae**, v. 164, p. 178-182, 2013. http://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.09.030

JAIN, R.; SRIVASTAVA, S.; SHRIVASTAVA, A. K. Changes in growth, cell division and metabolism of sugarcane in response to nickel. **Tropical Agriculture**, Trinidad, v. 86, n. 4, p. 128-133, 2009.

KAPPAUN, K.; PIOVESAN, A. R.; CARLINI, C. R.; LIGABUE-BRAUN, R. Ureases: Historical aspects, catalytic, and non-catalytic properties – A review. **Journal of Advanced Research**, v. 13, p. 3-17, 2018. https://doi.org/10.1016/j.jare.2018.05.010

KARP, S. G.; MEDINA, J. D. C.; LETTI, L. A. J.; WOICIECHOWSKI, A. L.; CARVALHO, J. C.; SCHMITT, C. C.; PENHA, R. O.; KUMLEHN, G. S.; SOCCOL, C. R. Bioeconomy and biofuels: the case of sugarcane ethanol in Brazil. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 15, n. 3, p. 899-912, 2021. https://doi.org/10.1002/bbb.2195

KHÖLLN, O. T.; GAVA, G. J. D. C.; CANTARELLA, H.; SILVA, S. R.; TRIVELIN, P. C. O. Sugarcane yield loss due to water and nitrogen deficiencies evaluated by carbon isotopic discrimination method. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, v. 33, n. 9, 2021. https://doi:10.9755/ejfa.2021.v33.i9.2756

KOCHENBORGER, A. C. D.; ORIOLI JÚNIOR, V.; SILVA, G. A.; SARGENTIM, M. M.; TORRES, J. L. R. Aplicação foliar de ureia, níquel e sacarose em estádio reprodutivo da soja. **Nativa**, v. 11, n. 1, p. 82-89, 2023. https://doi.org/10.31413/nativa.v11i1.13662

KUTMAN, B. Y.; KUTMAN, U. B.; CAKMAK, I. Nickel-enriched seed and externally supplied nickel improve growth and alleviate foliar urea damage in soybean. **Plant Soil**, v. 363, p. 61-75, 2013a. http://doi.org/10.1007/s11104-012-1284-6

KUTMAN, B. Y.; KUTMAN, U. B.; CAKMAK, I. Foliar nickel application alleviates detrimental effects of glyphosate drift on yield and seed quality of wheat. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 61, n. 35, p. 8364-8372, 2013b. http://doi.org/10.1021/jf402194v

KUTMAN, B. Y.; KUTMAN, U. B.; CAKMAK, I. Effects of seed nickel reserves or externally supplied nickel on the growth, nitrogen metabolites and nitrogen use efficiency of urea-or nitrate-fed soybean. **Plant and Soil**, v. 376, p. 261-276, 2014. http://doi.org/10.1007/s11104-013-1983-7

LAVRES, J.; FRANCO, G. C.; CÂMARA, G. M. de S. Soybean seed treatment with nickel improves biological nitrogen fixation and urease activity. **Frontiers in Environmental Science**, v. 4, p. 37, 2016. https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00037

LEITE, J. M.; ARACHCHIGE, P. S. P.; CIAMPITTI, I. A.; HETTIARACHCHI, G. M.; MAURMANN, L.; TRIVELIN, P. C. O.; PRASAD, P. V. V.; SUNOJ, S. V. J. Co-addition of humic substances and humic acids with urea enhances foliar nitrogen use efficiency in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). **Heliyon**, v. 6, n. 10, e05100, 2020. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05100

LI, M.; LIU, Z. Effects of reducing application amount of base fertilizer and increasing application time of leaf fertilizer on corn yield. **Journal of Agricultural Science and Technology**, Changsh, v. 16, n. 5, p. 947-950, 2015.

LI, Z. P.; PATERLINI, A.; GLAVIER, M.; BAYER, E. M. Intercellular trafcking via plasmodesmata: molecular layers of complexity. **Cellular and Molecular Life Sciences**, v. 78, p. 799–816, 2021. https://doi.org/10.1007/s00018-020-03622-8

LI, S.; YANG, D.; TIAN, J.; WANG, S.; YAN, Y.; HE, X.; DU, Z.; ZHONG, F. Physiological and transcriptional response of carbohydrate and nitrogen metabolism in tomato plant leaves to nickel ion and nitrogen levels. **Scientia Horticulturae**, v. 292, p. 110620, 2022. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110620

LIMA, A. M. S.; OLIVEIRA, E. C. A.; MARTINS, V. R. S.; SILVA, L. B.; SOUZA, P. H. N.; FREIRE, F. J. Integrated application of nitrogen, molybdenum and plant growth-promoting rhizobacterium can enhance the sugarcane growth. **SugarTech**, v. 24, n. 6, p. 1748-1756, 2022. https://doi.org/10.1007/s12355-022-01133-3

LIU, W.; ZHENG, L.; QI, D. Variation in leaf traits at different altitudes reflects the adaptive strategy of plants to environmental changes. **Ecology and Evolution**, v. 10, n. 15, p. 8166-8175, 2020. https://doi.org/10.1002/ece3.6519

MAJUMDAR, R.; BARCHI, B.; TURLAPATI, S. A.; GAGNE, M.; MINOCHA, R.; LONG, S.; MINOCHA, S. Glutamate, ornithine, arginine, proline, and polyamine metabolic interactions: the pathway is regulated at the post-transcriptional level. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 78, 2016. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00078

MARIANO, E.; OTTO, R.; MONTEZANO, Z. F.; CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O. Soil nitrogen availability index as predictors of sugarcane nitrogen requirements. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 89, p. 25-37, 2017. https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.06.004

MAZZEI, L.; MUSIANI, F.; CIURLI, S. The structure-based reaction mechanism of urease, a nickel dependent enzyme: tale of a long debate. **Journal of Biological Inorganic Chemistry**, v. 25, n. 6, p. 829-845, 2020. https://doi.org/10.1007/s00775-020-01808-w

MISKOWIEC, P.; OLECH, Z. Searching for the correlation between the activity of urease and the content of nickel in the soil samples: The role of metal speciation. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, n. 4, p. 1904–1911, 2020. https://doi.org/10.1007/s42729-020-00261

MORAES, M. F.; REIS, A. R.; MORAES, L. A. C.; LABRES-JUNIOR, J.; VIVIAN, R.; CABRAL, C. P.; MALAVOLTA, E. Effects of molybdenum, nickel, and nitrogen sources on the mineral nutrition and growth of rice plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 40, n. 21-22, p. 3238-3251, 2009. https://doi.org/10.1080/00103620903267590

MORETTI, S. M. L.; BERTONCINI, E. I.; VITTI, A. C.; ALLEONI, L. R. F.; ABREU-JUNIOR, C. H. Concentration of Cu, Zn, Cr, Ni, Cd, and Pb in soil, sugarcane leaf and juice: residual effect of sewage sludge and organic compost application. ***Environmental Monitoring and Assessment***, 188, n. 3, a163, p. 1-12, 2016. https://doi.org/10.1007/s10661-016-5170-1

NIU, J.; LIU, C.; HUANG, M.; LIU, K.; YAN, D. Effects of foliar fertilization: a review of current status and future perspectives. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, p. 104-118, 2021. https://doi.org/10.1007/s42729-020-00346-3

NOGUEIRA, T. A. R.; FRANCO, A.; HE, Z.; BRAGA, V. S.; FIRME, L. P.; ABREU-JUNIOR, C. H. Short-term usage of sewage sludge as organic fertilizer to sugarcane in a tropical soil bears little threat of heavy metal contamination. **Journal of Environmental Management**, v. 114, p. 168–177, 2013. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.09.012

OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, R. I.; FREIRE, M. B. G. S.; SIMÕES NETO, D. E.; SILVA, S. A. M. Extração e exportação ode nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1343-1352, 2010. https://doi.org/10.1590/s0100-06832010000400031

OLIVEIRA, J. B.; LAVRES, J.; KOPITTKE, P. M.; CHANEY, R. L.; HARRIS, H. H.; ERSKINE, D.; HOWARD, D. L.; REIS, A. R.; VAN DER ENT, A. Unravelling the fate of foliar-applied nickel in soybean: a comprehensive investigation. **Plant and Soil**, v. 502, p. 1-20, 2024. https://doi.org/10.1007/s11104-024-06567-0

OLIVEIRA, J. B.; LAVRES, J.; VAN DER ENT, A. In situ analysis of nickel uptake from foliar application in pecan using instrumental µXRF analysis. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, p. 1-9, 2021. https://doi.org/10.1007/s42729-021-00599-6

PEREIRA, W.; OLIVEIRA, R. P.; PEREIRA, A.; SOUSA, J. S.; SCHULTZ, N.; URQUIAGA, S.; REIS, V. M. Nitrogen acquisition and ^{15}N-fertiliser recovery efficiency of sugarcane cultivar RB92579 inoculated with five diazotrophs. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 119, n. 1, p. 37-50, 2021. http://doi.org/10.1007/s10705-020-10100-x

POLACCO, J. C.; MAZZAFERA, P.; TEZOTTO, T. Opinion–nickel and urease in plants: still many knowledge gaps. **Plant Science**, v. 199, p. 79-90, 2013. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2012.10.010

PRATELLI, R.; PILOT, G. Regulation of amino acid metabolic enzymes and transporters in plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 65, n. 19, p. 5535-5556, 2014. https://doi.org/10.1093/jxb/eru320

RAFIULLAH; KHAN, M. J.; MUHAMMAD, D.; MUSSARAT, M.; HUMA; ADNAN, M.; FAHAD, S.; WAHID, F.; ARIF, M.; AMANULLAH JR. Foliar versus soil phosphorus (P) application for improving P use efficiency in wheat and maize in calcareous soils. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 11, p. 1598-1610, 2021. https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1871744

RAMPAZZO, M. V.; CUNHA, M. L. O.; OLIVEIRA, L. C. A.; SILVA, V. M.; LANZA, M. G. D. B.; MELO, A. A. R.; REIS, A. R. Physiological roles of nickel on antioxidant and nitrogen metabolism increasing the yield of sugarcane plants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 4, p. 4438–4448, 2022. https://doi.org/10.1007/s42729-022-01045-x

RIZWAN, M.; USMAN, K.; ALSAFRAN, M.; AL JABRI, H.; SAMREEN, T.; SALEEM, M. H.; TU, S. Nickel toxicity interferes with NO_3^-/NH_4^+ uptake and nitrogen metabolic enzyme activity in rice (*Oryza sativa* L.). **Plants**, v. 11, n. 11, p. 1401, 2022. https://doi.org/10.3390/plants11111401

RODAK, B. W.; FREITAS, D. S.; ROSSI, M. L.; LINHARES, F. S.; MORO, E.; CAMPOS, C. N. S.; REIS, A. R.; GUILHERME, L. R.; LAVRES, J. A study on nickel application methods for optimizing soybean growth. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 10556, 2024. https://doi.org/10.1038/s41598-024-58149-w

SALTHAMMER, T.; GUNSCHERA, J. Release of formaldehyde and other organic compounds from nitrogen fertilizers. **Chemosphere**, v. 263, p. 127913, 2021. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127913

SANTANA, A. C. A. *et al*. Critical nitrogen dilution curves and productivity assessments for plant cane. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 24, n. 4, p. 244-251, 2020. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n4p244-251

SANTOS, R. L.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, M. B. G. S.; WEST, J. B.; BARBOSA, J. A.; MOURA, M. J. A.; BEZERRA, P. C. Nitrate reductase activity and nitrogen and biomass accumulation in sugarcane under molybdenum and nitrogen fertilization. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 43, p. e0180171, 2019. https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20180171

SCHERTL, P.; CABASSA, C.; SAADALLAH, K.; BORDENAVE, M.; SAVOURÉ, A.; BRAUN, H. Biochemical characterization of proline dehydrogenase in *Arabdopsis* mitochondria. **The FEBS Journal**, v. 281, p. 2794-2804, 2014. https://doi.org/10.1111/febs.12821

SHAHZAD, B.; TANVEER, M.; REHMAN, A.; CHEEMA, S. A.; FAHAD, S.; REHMAN, S.; SHARMA, A. Nickel; whether toxic or essential for plants and environment - A review. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 132, p. 641-651, 2018. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.10.014

SIDDAPPA, S.; MATATHE, G. K. What we know about plant arginases?. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 156, p. 600-610, 2020. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.10.002

SILVA, A. M. de S.; OLIVEIRA, E. C. A.; ANDRADE, J. J.; LIMA, A. M. S.; ALMEIDA, B. G. A.; TRIVELIN, P. C. O.; FREIRE, F. J.; GUIMARÃES, D. H. The leaching potential and recovery of ^{15}N-fertilizer by sugarcane cultivated in sandy soil. **SugarTech**, v. 26, n. 5, p. 1-15, 2024. https://doi.org/10.1007/s12355-024-01479-w

SILVA, J. A. The importance of the wild cane *Saccharum spontaneum* for bioenergy genetic breeding. **SugarTech**, v. 19, n. 3, p. 229-240, 2017. https://doi.org/10.1007/s12355-017-0510-1

SREEKANTH, T. V. M.; NAGAJYOTHI, P. C.; LEE, K. D.; PRASAD, T. N. V. K. V. Occurrence, physiological responses and toxicity of nickel in plants. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 10, n. 5, p. 1129-1140, 2013. http://doi.org/10.1007/s13762-013-0245-9

SUBHANULLAH, R. M. K.; RAHMAN, H. U. Influence of foliar urea on the phenology, growth and yield of maize applied at various growth stages. **Pure and Applied Biology**, Quetta, v. 6, n. 1, p. 247-255, 2017. http://doi.org/10.19045/bspab.2017.60020

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MøLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia do desenvolvimento vegetal.** 6ª ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858p.

TARATIMA, W.; RITMAHA, T.; JONGRUNGKLANG, N.; MANEERATTANARUNGROJ, P.; KUNPRATUM, N. Effect of stress on the leaf anatomy of sugarcane cultivars with different drought tolerance (*Saccharum officinarum*, Poaceae). **Revista de Biología Tropical**. v. 68, n. 4, p. 1159-1170, 2020.

TENELLI, S.; OTTO, R.; BORDONAL, R. O.; CARVALHO, J. L. N. How do nitrogen fertilization and cover crop influence soil CN stocks and subsequent yields of sugarcane?. **Soil and Tillage Research**, v. 211, p. 104999, 2021. https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104999

TREDENICK, E. *et al*. Nonlinear porous diffusion modeling of hydrophilic ionic agrochemicals in astomatous plant cuticle aqueous pores: A mechanistic approach. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 8, p. 746, 2017. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00746

TRIVELIN, P. C. O.; CARVALHO, J. G.; SILVA, A. D.; PRIMAVESI, A. D. A.; CAMACHO, E.; EIMORE, I.; GUILHERME, M. R. Adubação foliar de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.): Absorção e translocação de ureia – ^{15}N. **Energia Nuclear na Agricultura**, Piracicaba, v. 9, n. 2, p. 52-65, 1988.

TRIVELIN, P. C. O.; VITTI, A. C.; OLIVEIRA, M. W.; GAVA, G. J. C.; SARRIÉS, G. A. Utilização de nitrogênio e produtividade da cana-de-açúcar (cana-planta) em solo arenoso com incorporação de resíduos da cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 637-646, 2002. https://doi.org/10.1590/s0100-06832002000300008

TSANG, K. L.; WONG, K. Moving nickel along the hydrogenase–urease maturation pathway. **Metallomics**, v. 14, n. 5, p. mfac003, 2022. https://doi.org/10.1093/mtomcs/mfac003

UĞURLAR, F. Influence of nickel on urease activity and nitrogen dynamics in maize (*Zea mays*) under saline conditions. *MAS* **Journal of Applied Sciences**, v. 9, n. 4, p. 984-994, 2024. http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.1430627

UNGUREANU, N.; VLADUT, V.; BIRIS, S. Sustainable valorization of waste and by-products from sugarcane processing. **Sustainability**, v. 14, n. 17, p. 11089, 2022. 9. https://doi.org/10.3390/su141711089

USCOLA, M.; VILLAR-SALVADOR, P.; OLIET, J.; WARREN, C. R. Foliar absortion and root translocation of nitrogen from different chemical forms in seedlings of two Mediterranean trees. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v. 104, p. 34-43, 2014. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.03.004

WANDERLEY, L. R. S.; OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; SIMÕES NETO, D. E.; SANTOS, R. L. Nutritional requirement by irrigated brazilian sugarcane varieties. **SugarTech**, v. 23, n. 4, p. 762-775, 2021. https://doi.org/10.1007/s12355-020-00921-z

WANG, Y.; YING, H.; YIN, Y.; ZHENG, H.; CUI, Z. Estimating soil nitrate leaching of nitrogen fertilizer from global meta-analysis. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 657, p. 96-102, 2019. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.029

WINTER, G.; TODD, C. D.; TROVATO, M.; FORLANI, G.; FUNCK, D. Physiological implications of arginine metabolism in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, p. 534, 2015. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00534

WITTE, C. P. Urea metabolism in plants. **Plant Science**, Limerick, v. 180, n. 3, p. 431-438, 2011. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.11.010

YANG, Y.; GAO, S.; JIANG, Y.; LIN, Z.; LUO, J.; LI, M.; GUO, J.; SU, Y.; XU, L; QUE, Y. The physiological and agronomic responses to nitrogen dosage in different sugarcane varieties. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 406, 2019. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00406

YUSUF, M.; FARIDUDDIN, Q.; HAYAT, S.; AHMAD, A. Nickel: an overview of uptake, essentiality and toxicity in plants. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 86, p. 1-17, 2011. https://doi.org/10.1007/s00128-010-0171-1

ZENG, X.; ZHU, K.; LU, J. M.; JIANG, Y.; YANG, L. T.; XING, Y. X.; LI, Y. R. Long-term effects of different nitrogen levels on growth, yield, and quality in sugarcane. **Agronomy**, v. 10, n. 3, p. 353, 2020. https://doi:10.3390/agronomy10030353

ZHANG, Y.; DING, H.; ZHENG, X.; CAI, Z.; MISSELBROOK, T.; CARSWELL, A.; MÜLLER, C.; ZHANG, J. Soil N transformation mechanisms can effectively conserve N in soil under saturated conditions compared to unsaturated conditions in subtropical China. **Biology and Fertility of Soils**, Nova York, v. 54, p. 495-507, 2018. https://doi.org/10.1007/s00374-018-1276-7

ZHANG, K.; LI, S.; XU, Y.; ZHOU, Y.; RAN, S.; ZHAO, H.; HUANG, W. XU, R.; ZHONG, F. Effect of nickel ions on the physiological and transcriptional responses to carbon and nitrogen metabolism in tomato roots under low nitrogen levels. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 19, p. 11398, 2022. https://doi.org/10.3390/ ijms231911398

ZHAO, D.; GLAZ, B.; COMSTOCK, J. C. Physiological and growth responses of sugarcane genotypes to nitrogen rate on a sand soil. **Journal Agronomy and Crop Science**, Malden, v. 200, n. 4, p. 290-301, 2014. https://doi.org/10.1111/jac.12084

3. CAPÍTULO II – METABOLISMO DA UREIA NA CANA-DE-AÇÚCAR COM APLICAÇÃO DE NÍQUEL VIA FOLIAR

Resumo

A pulverização foliar de forma complementar à adubação de solo com nitrogênio (N) é uma alternativa para aumentar o aproveitamento do fertilizante nitrogenado pela cana-de-açúcar. O fornecimento de ureia foliar requer a definição adequada da dose para evitar acúmulo de ureia e queima foliar. Os danos foliares devido à ureia em excesso podem ser minimizados pela disponibilidade de níquel (Ni), um micronutriente ainda pouco estudado na nutrição da cultura. O Ni é responsável pela ativação da urease, enzima que hidrolisa a ureia para liberação do amônio que será utilizado pela planta. A adição de Ni no manejo nutricional ativa o metabolismo de N e o sistema de defesa das plantas. Em excesso, o Ni provoca a inativação de enzimas, comprometimento da atividade fotossintética e redução da absorção de nutrientes. O objetivo desse estudo foi avaliar a adição de Ni na calda de pulverização foliar com ureia no estímulo do metabolismo da ureia na cana-de-açúcar, de forma a possibilitar o aumento da dose de ureia sem risco de toxidez. O estudo foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento de blocos ao acaso, com quatro repetições, e arranjo de tratamentos em fatorial, com 4 doses de Ni x 4 doses de ureia. Duas plantas foram mantidas em vasos preenchidos com substrato arenoso por 120 dias. As folhas +1, +2 e +3 foram pulverizadas aos 110 dias após o plantio. As coletas foram realizadas aos 3 dias e 7 dias após a pulverização foliar (APF). As variáveis avaliadas foram atividade da urease (AU), teor de ureia (TU), teor de amônio solúvel (AS), teor de aminoácidos (AA), peroxidação lipídica (MDA), índices de clorofila, teor de N e Ni na planta inteira, biometria da parte aérea. As plantas que receberam doses altas de ureia apresentaram queima intensa no ápice foliar e o Ni não reduziu esse efeito. Não houve efeito do Ni sobre a AU, TU e AA. O Ni atuou na redução do teor de amônio em plantas que receberam 29 % de ureia. AU foi modificada apenas pela pulverização foliar com ureia, com atividade de 10 µmol NH_4^+ g^{-1} h^{-1} até 7 dias APF, independente da dose de ureia. AS e TU foram altos em plantas pulverizadas com 29 % de ureia, mas somente o teor de ureia se manteve alto até 7 dias APF. O estresse associado à queima foliar foi leve. A pulverização aumentou o teor de N e Ni foliar. Houve remobilização do Ni para a folha não pulverizada. Não houve efeito da pulverização sobre o crescimento aos 7 dias APF. O manejo foliar com 7 % de ureia e 058 mM de Ni apresentou o melhor desempenho sobre o metabolismo da planta, sem causar queima foliar ou danificar o aparato fotossintético. A combinação de ureia e Ni pode ser utilizada para estimular o metabolismo de N da cana-de-açúcar, com potencial de redução da quantidade de N-fertilizante no ciclo da cultura. O efeito desse manejo sobre o crescimento da cultura precisa ser avaliado.

Palavras-chave: Assimilação de amônio. Atividade da urease. Toxidez por amônio. Nutrição da cana-de-açúcar.

LEAF NICKEL SPRAY ON SUGARCANE UREA METABOLISM

Abstract

Leaf spraying combined with nitrogen (N) soil fertilization is an alternative to increasing N-fertilizer recovery by sugarcane. Urea application to leaves requires precise dosage to prevent urea accumulation and leaf scorching. These damages can be minimized by nickel (Ni) availability, a micronutrient that has not yet been thoroughly studied in sugarcane nutrition. Ni activates the urease, an enzyme that hydrolyzes urea and releases ammonium for plant use. The addition of Ni in nutritional management activates N metabolism and plant defense system. Excessive Ni can lead to enzyme inactivation, photosynthesis impairment, and reduced nutrient absortion. The objective of this study was to evaluate Ni addition to the leaf spray whith urea to stimulate urea metabolism, enabling higher urea doses without risk of toxicity. The greenhouse assay was carried out using a randomized block design with four replications and factorial arrangement of treatments: 4 Ni doses x 4 urea doses. Two plants were grown in pots filled with sandy substrate by 120 days. Leaves +1, +2, and +3 were sparyed at 110 days after planting. Samples were collected at 3 and 7 days after foliar spraying (AFS). The evaluated variables included urease activity (UA), urea content (UC), soluble ammonium content (SA), amino acid content (AA), lipid peroxidation (MDA), chlorophyll a fluorescence, Falker a chlorophyll index, total N and Ni content in th whole plant, and shoot growth measurements. Plants that received high urea doses exhibited leaf tip scorching, which was not mitigated by Ni. Ni had no effect on UA, UC or AA. However, Ni was reduced the SA in plants treated with 29 % urea spray. UA was influenced only by urea spraying, maintaining an activity of 10 µmol NH_4^+ g^{-1} h^{-1} up to 7 days AFS, regardless of the urea dose. SA and UC were high in plant treated with 29 % ureia spray, but only UC remained high up to 7 days AFS. The stress associated with leaf scorching was mild. Foliar spraying increased leaf N and Ni content, with Ni remobilization to the unsprayed leaf. There was no effect of spraying on plant growth at 7 days AFS. Foliar management with 7% urea plus 0.58 mM Ni showed the best performance in plant metabolism, without leaf scorching or photosynthesis impairment. The combination of urea and Ni can be used to stimulate N metabolism in sugarcane, and it has the potential to reduce the quantity of N-fertilizer use in the crop cycle. The impact of this management on sugarcane growth needs further evaluation.

Keywords: Ammonium assimilation. Urease activity. Ammonium toxicity. Sugarcane nutrition.

3.1. Introdução

A ureia é fonte de nitrogênio (N) mais utilizada nas pulverizações foliares devido à alta solubilidade, concentração em N e permeabilidade na cutícula das folhas (TRIVELIN et al., 1988; USCOLA et al., 2014). Uma vez absorvida, a ureia é hidrolisada na célula pela enzima urease, liberando duas moléculas de amônio e uma de CO_2, que serão utilizados no metabolismo de N e carbono, respectivamente. Essa reação é ativada pelo níquel (Ni), um micronutriente também envolvido no sistema de defesa da plantam as ainda pouco estudado na cultura da cana-de-açúcar (BARCELOS et al., 2017; RAMPAZZO et al., 2022).

O papel do Ni na ativação do metabolismo de N promove aumento no teor de aminoácidos, proteínas e bases nitrogenadas, o que se converte em maior fotossíntese, crescimento e produção de biomassa (ALIBAKHSHI; KHOSHGOFTARMANESH, 2015; FREITAS et al., 2019). O excesso de Ni tem efeito tóxico, interferindo em rotas metabolismo basal das plantas, tais como: síntese de clorofila, fotossíntese, atividade enzimática, redução da absorção de nutrientes, redução do crescimento radicular (SHAHZAD et al., 2018).

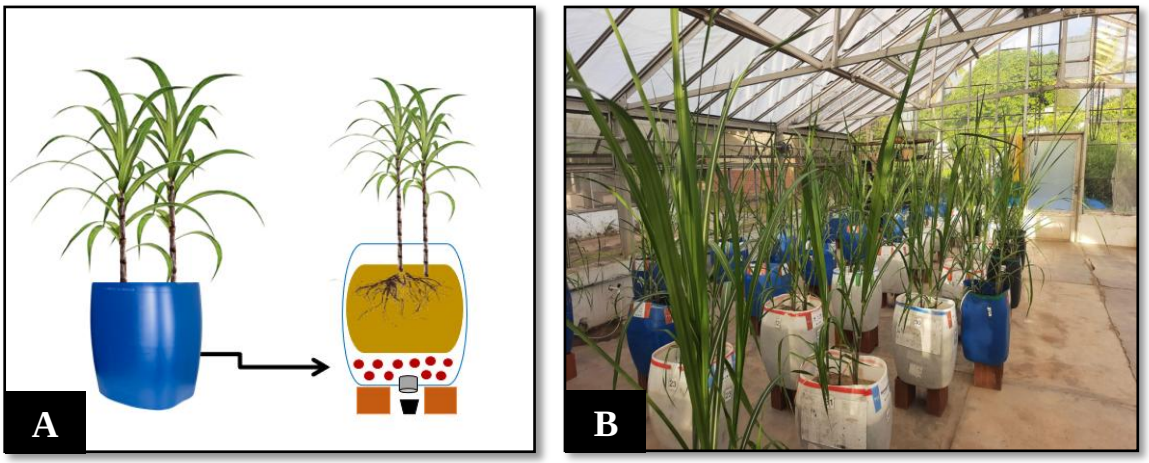
De forma semelhante, o excesso de ureia pode causar danos celulares, danos necróticos nas folhas e reduzir o crescimento (CASTRO et al, 2023). A alta demanda da cana-de-açúcar por N pode levar ao uso de doses altas de ureia via folha, uma vez que essa é uma forma de fertilização nitrogenada com maior aproveitamento do N do que a adubação via solo, com alto risco de queima foliar (CASTRO et al., 2022; 2023). Nesse contexto, a combinação de ureia e Ni via foliar pode aumentar a metabolização da ureia, reduzir os danos pelo acúmulo de ureia no tecido (KUTMAN; KUTMAN; CAKMAK, 2013), e permitir aumentar a dose de ureia na folha. Para isso, se faz necessário identificar doses de Ni e ureia que possibilitam aumentar a dose ureia via folha, sem comprometer o metabolismo das plantas.

O objetivo desse estudo foi avaliar se a adição de Ni na calda de pulverização foliar com ureia acelera o metabolismo da ureia na cana-de-açúcar, e avaliar a dose de Ni e ureia a ser utilizada para promover esse estímulo na cultura.

3.2. Material e Métodos

O experimento foi conduzido em casa de vegetação localizada no Departamento de Agronomia da Universidade Federal Rural de Pernambuco/Campus Recife (8°01'00.5"S 34°56'40.6"W), durante 120 dias, no período de agosto 2021 a janeiro de 2022. As plantas foram cultivadas em vasos de 50 L, com dreno instalado ao fundo. A base interna foi revestida com camada de 10 cm de cascalho (brita n°19), e preenchidos com 45 L (54 kg) de substrato arenoso. Na saída do dreno foi instalado um coletor para reaproveitamento do líquido drenado na irrigação (**Figura 1**).

Figura 1 – Esquema de montagem dos vasos (A) e distribuição das unidades experimentais em casa de vegetação (A).



Fonte: Acervo pessoal.

3.2.1. *Caracterização do substrato*

O substrato utilizado foi areia de construção, oriunda de diferentes origens da região circunvizinha de Recife. A caracterização química e física desse substrato arenoso seguiu as metodologias propostas por Teixeira (2017). A caracterização física consistiu na avaliação granulométrica pelo método da pipeta para definição do grupamento textural. A caracterização química consistiu na análise de pH em água (1:2,5); acidez potencial extraída em acetato de cálcio 0,5 mol L^{-1}; Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, Na^{+}, Mn, Fe, Cu e Zn em Mehlich 3; Al^{3+} foi extraído em NH_4Cl; O P foi extraído em Mehlich 1; P-remanescente foi determinado usando solução com 100 mg de P e cloreto de Ca como extrator; Ni foi extraído por digestão total em ácido fluorídrico; carbono orgânico total (C.O.T.) por combustão úmida com dicromato de sódio O P, P-rem e Al^{3+} foram determinados por espectrofotometria; Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, Na^{+}, Mn, Fe, Cu, Zn e Ni por espectroscopia de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES);

C.O.T. foi determinado por titulometria. A partir desses resultados foram calculadas a saturação de bases (V%), saturação de Al (m%), e a capacidade de troca catiônica (CTC) efetiva e potencial. Os resultados da caracterização química e física estão descritos na **Tabela 1**

Tabela 1 - Caracterização química e física do substrato arenoso

Atributos químicos		**Atributos Físicos**	
pH_{H2O}(1:2,5)	5,15	**Grupamento textural**	Arenoso
	g dm^{-1}		g kg^{-1}
C.O.T.	1,71	**Areia total**	900
	$cmol_c\ dm^{-3}$	**Areia grossa**	680
Ca^{2+}	0,31	**Areia fina**	220
Mg^{2+}	0,19	**Silte**	20
K^{+}	0,04	**Argila**	80
Na^{+}	0,02		g cm^{-3}
Al^{3+}	0,56	**Ds**	1,63
	mg L^{-1}	**Dp**	2,55
P-rem	30,47		%
	mg dm^{-3}	**Porosidade total**	36,07
P	100,26		$cm^3\ cm^{-3}$
Fe^{2+}	52,14	**θ_{cc}**	0,16
Cu^{2+}	0,11	**θ_{pmp}**	0,01
Mn^{2+}	0,06		mm
Zn^{2+}	0,47	**AD**	117,4
	mg kg		
Ni	0,42*		
	$cmol_c\ dm^{-3}$		
H+Al	3,47		
SB	0,56		
$CTC_{efetiva}$	1,12		
$CTC_{potencial}$	4,03		
	%		
V	13,89		
m	50,00		

*teor total; C.O.T.: carbono orgânico total; P-rem: P remanescente; SB: soma de bases; m: saturação por alumínio; V: saturação por bases; Ds: densidade do solo; Dp: densidade de partículas; θ_{cc}: umidade na capacidade de campo; θ_{pmp}: umidade no ponto de murcha permanente; AD: água disponível; CTC: capacidade de troca catiônica.

3.2.2. *Condução experimental*

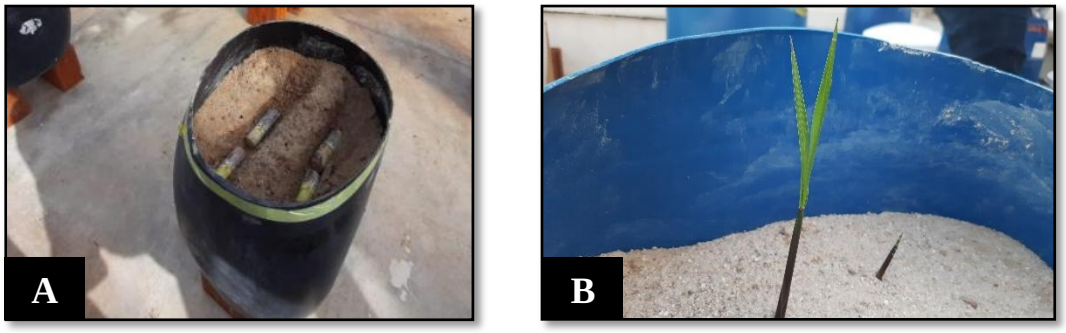
A correção da acidez do substrato arenoso foi realizada 40 dias antes do plantio, com base em curva de incubação, considerando a elevação dos teores de Ca e Mg, manutenção da relação 2,6 ed Ca:Mg (OLIVEIRA et al., 2010), e elevação da saturação de bases para 60 %. Os reagentes utilizados para correção foram hidróxido de cálcio e óxido de magnésio em suspensão com água deionizada, homogeneizados manualmente ao substrato arenoso. No período de incubação, a umidade equivalente à capacidade de pote foi mantida.

O plantio foi realizado utilizando quatro colmos-semente com 5,0 cm de comprimento e uma gema viável, da variedade RB867515, colhida aos oito meses de idade. A variedade foi

selecionada pela representatividade nacional (RIDESA, 2025), e apresentar desenvolvimento rápido (SANTOS et al., 20219).

Os colmos-semente foram dispostos em dois sulcos com 15 cm de profundidade (**Figura 2 - A**) e posteriormente cobertos. O substrato foi mantido úmido na superfície, com regas diárias de 0,4 L de água até a emergência das mudas, observada aos sete dias após o plantio (DAP) (**Figura 2 - B**).

Figura 2 – Registro do plantio (A) e da emergência das plantas (B), aos sete dias após o plantio



Fonte: Acervo pessoal.

O monitoramento da umidade do substrato foi realizado duas vezes na semana, por meio de amostragem do substrato em 12 vasos na profundidade de 15 cm, em latas de alumínio. Em seguida, as amostras foram secas em estufa (105 °C) por 24 h, e pesadas para obtenção da umidade na base de massa. A irrigação foi realizada diariamente de forma manual com água deionizada. O volume de água aplicado foi estimado com base na curva característica de retenção de água no solo (**Figura 3**). Até 60 dias após o plantio (DAP), a umidade foi mantida em 40 % da capacidade de pote (θ_m = 21,35 %), e após esse período foi mantida a 60 % da capacidade de pote (θ_m = 32 %).

O volume drenado durante o período experimental foi coletado e retornou ao vaso compondo o volume de água aplicado na irrigação. Até o final do ciclo, cada vaso recebeu 146 L de água, sendo 7,5 L até 15 DAP e 138,5 L até o final do ciclo de 120 dias (**Figura 4**).

Temperatura e umidade relativa do ar foram monitorados ao longo do ciclo de avaliação por meio de termo-higrômetro instalado dentro da casa de vegetação. Os picos máximos e mínimos de temperatura e umidade foram registrados nos meses de novembro e dezembro, com valores de 46,6 ºC e 21,6 ºC, e 90 % e 18,5 %, respectivamente (**Figura 4**).

Figura 3 – Curva característica de retenção de água no solo. Modelo para o teor de água (θ) em função do potencial matricial (Ψ_m) para o substrato arenoso utilizado no experimento, ajustado pela equação de Van Genuchten. (--) Umidade e tensão na capacidade de campo.

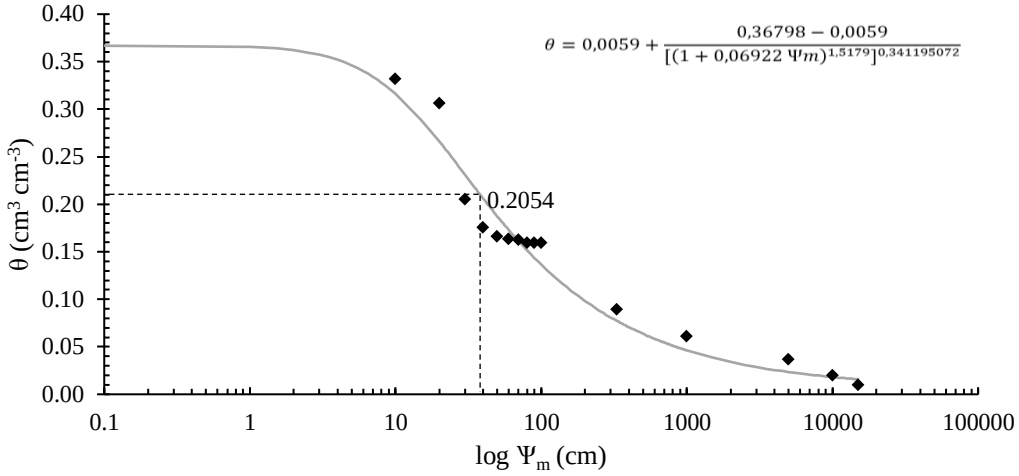
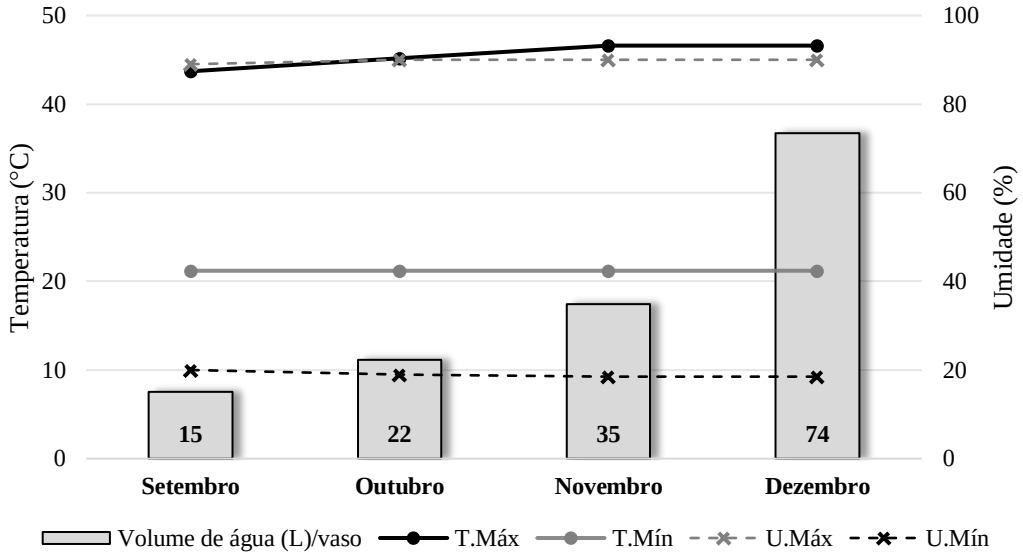


Figura 4 – Monitoramento mensal da temperatura máxima (T.Máx) e mínima (T.Mín), umidade máxima (U.Máx) e mínima (U.Mín) da casa de vegetação e do volume de água utilizado por vaso no período de 120 dias.



3.2.3. *Manejo nutricional*

Aos 15 dias após a emergência das plantas em todos os vasos (30 DAP), os nutrientes foram fornecidos via solução nutritiva proposta por Arnon e Hoagland (1950), preparada com água deionizada. Cada aplicação da solução nutritiva forneceu 210 mg L^{-1} de N, 31 mg L^{-1} de P, 234,6 mg L^{-1} de K, 200,6 mg L^{-1} de Ca, 48,6 mg L^{-1} de Mg, 64,2 mg L^{-1} de S, 500 µg L^{-1} de B, 20 µg L^{-1} de Cu, 648 µg L^{-1} de Cl, 5022 µg L^{-1} de Fe, 502 µg L^{-1} de Mn, 50 µg L^{-1} de Zn, 10 µg L^{-1} de Mo. A solução contendo todos os nutrientes (solução de aplicação) apresentou pH 7,0 e CE de 2,18 mS cm^{-1}. Duas vezes por semana, a rega foi substituída pela solução nutritiva, mantendo o volume de água pré-estabelecido para irrigação.

A dose de N no solo (4,0 g $vaso^{-1}$ de N) foi baseada na extração da cana-de-açúcar RB867515, obtida no estudo de Silva (2020), que utilizou uma planta por vaso e que apresentou teores foliares de N acima do nível crítico. No presente estudo, os vasos foram conduzidos com duas plantas, assim, as plantas cresceram sob condições subótimas de N, o que favorece a resposta à adubação foliar.

Inicialmente, o N foi fornecido utilizando ureia (47 % de N; 2,5 mL L^{-1} $vaso^{-1}$) e nitrato de cálcio ($Ca(NO_3)_2$; 17 % de N; 5,0 mL L^{-1} $vaso^{-1}$), para garantir o fornecimento de N nítrico e amoniacal (78 % NO_3^- / 22 % NH_4^+). A concentração de N sugerida por Arnon e Hoagland (1950) foi mantida.

Aos 40 DAP, as duas plantas menos vigorosas foram removidas por meio de corte rente ao solo para evitar interferir no sistema radicular das plantas mantidas nos vasos. O estudo foi conduzido com duas plantas por vaso, e a cada início de rebrota foram realizados novos cortes.

A partir dos 60 DAP, o N foi fornecido apenas com a fonte nítrica ($Ca(NO_3)_2$; 7,5 mL L^{-1} $vaso^{-1}$). Essa modificação não alterou a CE da solução de aplicação. A mudança simulou a disponibilidade de N às plantas no cultivo em campo que é predominantemente nítrica. A partir desse período, o N foi aplicado três vezes na semana, com intervalo de um dia entre as aplicações, para fornecer a dose de N via solo (4,0 g $vaso^{-1}$) antes de cessar o fornecimento de N antes da aplicação foliar.

Aos 60 DAP foi realizado tratamento fitossanitário em resposta ao ataque de pragas sugadoras (pulgões e ácaros), utilizando uma aplicação de tiametoxam (8,0 g de *Actara 250 WG*®) seguida de três aplicações de abamectina (0,5 mL de *Kraft 36 EC*®), em solução de 1,0 L. O intervalo das aplicações foi de sete dias. Foram realizadas quatro aplicações de solução de *Bacillus thuringiensis* (*DimyPel*®) para prevenir danos por infestação de lagartas (após identificar presença de lagarta causando danos nas folhas) com intervalo de 15 dias.

Aos 90 DAP, o N foi removido da solução após realizar redução de 50 % na semana anterior à remoção. Essa condição simula as condições de disponibilidade de N para as plantas em campo. A partir desse período, 10 vasos foram monitorados realizando a marcação da folha +1, e leituras com clorofilômetro portátil Falker (*ClorofiLog*® CFL1030) para obtenção do índice de clorofila total (IFC). O IFC tem alta correlação com o estado nutricional de N, de forma que a redução do índice indica redução dos teores foliares de N, o que seria consequência da redução do suprimento de N pelo substrato. Assim, o IFC foi utilizando para definir o momento da aplicação foliar.

3.2.4. *Pulverização foliar e distribuição dos tratamentos*

Os tratamentos consistiram em 04 doses foliares de N e 04 doses foliares de Ni, de forma complementar à adubação de N via solo, como descrito na **Tabela 2**. Os tratamentos foram distribuídos em arranjo fatorial (4x4), em delineamento blocos ao acaso, com 4 repetições, totalizando 64 parcelas. Os vasos foram dispostos com 50 cm de distância entre eles.

As doses de ureia aplicadas na folha foram de 0 % (0 kg ha^{-1} de N), 7 % (5,0 kg ha^{-1} de N), 14 % (10 kg ha^{-1} de N), e 29 % (20 kg ha^{-1} de N). Essas doses representam doses comerciais, exceto a dose foliar de 20 kg ha^{-1} de N, selecionada com base no risco de queima foliar (ANDRADE et al., 2024). As doses de Ni foram de 0,0 mM (0 g ha^{-1}), 0,85 mM (7,5 g ha^{-1}), 1,70 mM (15 g ha^{-1}), e 3,41 mM (30 g ha^{-1}). A dose mínima foi definida com base no estudo de Kutman, Kutman e Cakmak (2013) na cultura do trigo, e a dose máxima, no estudo de Barcelos *et al*. (2018) para a cultura da soja.

As fontes dos nutrientes utilizadas foram os reagentes puros para análise (P.A.) ureia (CH_4N_2O; 47 % de N) enriquecida (2 % de átomos de ^{15}N) e cloreto de Ni hexahidratado ($NiCl_2.6H_2O$; 24,7 % de Ni).

As soluções de aplicação foliar foram preparadas com água deionizada, mantendo a concentração do nutriente das doses propostas em calda de 150 L ha^{-1}. As doses foram apresentadas em concentrações (m/v) para ureia e molaridade (mM) para Ni.

Todas as soluções de aplicação receberam adjuvante surfactante (*Disperse Ultra*©, polidimetilsiloxano), mantendo a concentração da comercial (0,2 mL L^{-1}). Assim, o tratamento controle as folhas foram pulverizadas com solução de água+adjuvante. No dia seguinte à aplicação, pela manhã, as folhas foram hidratadas com água, com auxílio de borrifador manual para evitar a formação de sais na superfície foliar e favorecer a absorção (LEITE et al., 2020).

Tabela 2 – Descrição dos tratamentos do experimento conduzido em casa de vegetação

Tratamentos	N no solo (g vaso^{-1})	Foliar	
		Ni (mM)	Ureia (%)
T1	4,0	0	0
T2		0,85	0
T3		1,70	0
T4		3,41	0
T5		0	7%
T6		0,85	7%
T7		1,70	7%
T8		3,41	7%
T9		0	14%
T10		0,85	14%
T11		1,70	14%
T12		3,41	14%
T13		0	29%
T14		0,85	29%
T15		1,70	29%
T16		3,41	29%

Doses e fontes correspondentes: Ni: 7,5, 15 e 30 g ha^{-1} de Ni; **N:** 5, 10 e 20 kg ha^{-1} de N.

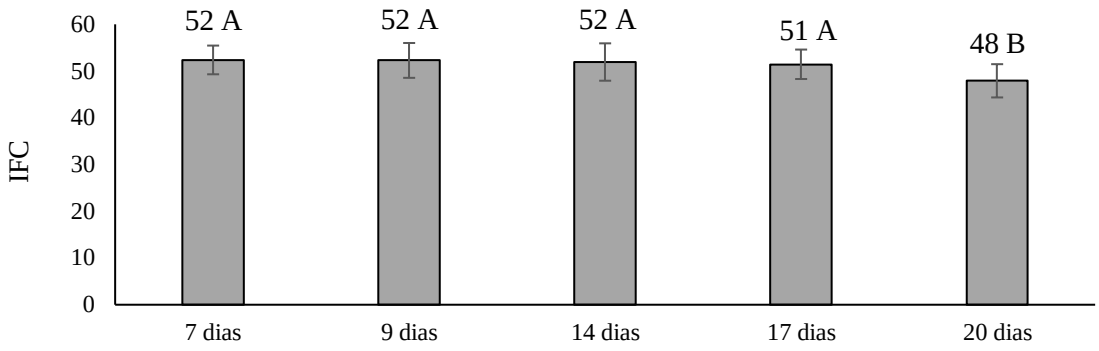
O monitoramento da condutividade elétrica (CE) de cada solução de aplicação mostrou aumento com a adição de ureia e Ni (**Tabela 3**). O aumento da concentração de Ni mostrou tendência de aumento da CE, enquanto o aumento da concentração de ureia aumentou de forma mais expressiva o pH na solução.

Tabela 3 – Propriedades químicas das soluções de aplicação foliar

Tratamentos	Ni	Cl	N	Ureia	CE	pH
	---------- mM ---------		%	%	µS cm^{-1}	
T1	0	0	0	0	224,9	7,3
T2	0,85	1,69	0	0	349,9	7,5
T3	1,70	3,38	0	0	630,8	7,7
T4	3,41	6,77	0	0	940,9	6,9
T5	0	0	3,3	7,0	136,7	8,4
T6	0,85	1,69	3,3	7,0	1.118,2	8,6
T7	1,70	3,38	3,3	7,0	1.483,0	8,8
T8	3,41	6,77	3,3	7,0	961,7	7,8
T9	0	0	6,7	14	255,8	8,5
T10	0,85	1,69	6,7	14	1.325,3	8,4
T11	1,70	3,38	6,7	14	1.661,1	8,7
T12	3,41	6,77	6,7	14	2.052,0	8,6
T13	0	0	13,3	29	381,9	8,5
T14	0,85	1,69	13,3	29	1.855,4	9,1
T15	1,70	3,38	13,3	29	2.063,3	8,9
T16	3,41	6,77	13,3	29	2.364,3	8,8

A aplicação foliar ocorreu aos 110 DAP, quando ocorreu a redução do IFC (20 dias após a remoção do N da solução nutritiva) (**Figura 5**). Nessa fase, a planta apresenta elevada demanda por N, potencializando a responsividade ao N aplicado via folha (FERNÁNDEZ; GIL-PELEGRÍN; EICHERT, 2021). Apesar da redução, o ICF obtido de 48, semelhante ao de plantas com teor adequado de N na folha (CERQUEIRA et al., 2019), indicando que a planta não apresentava deficiência de N.

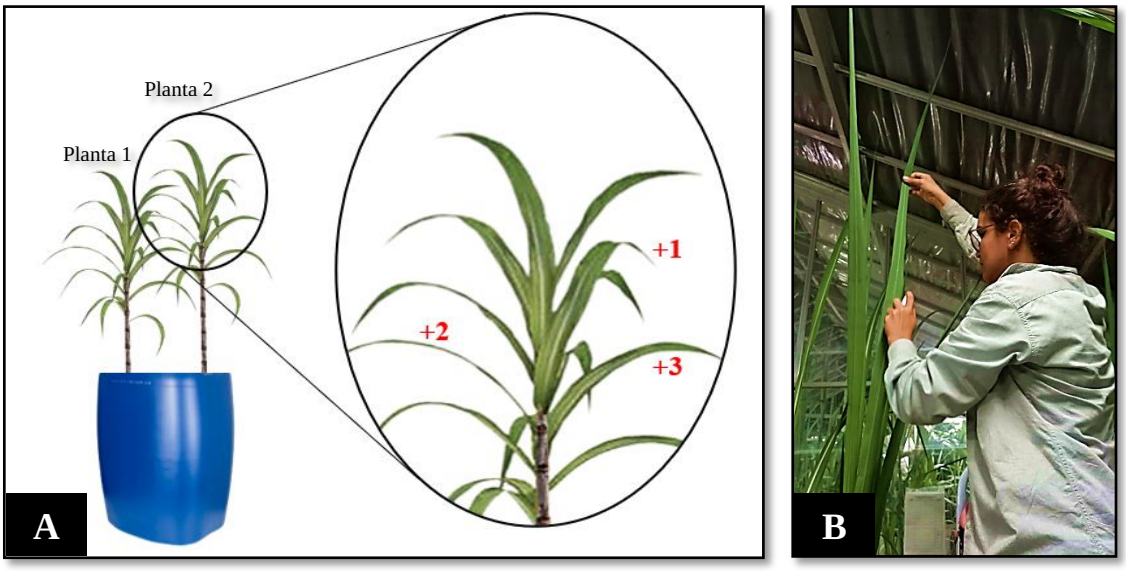
Figura 5 – Índice Falker de clorofila total após a remoção de N da solução nutritiva



Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

As soluções foram pulverizadas no final da tarde (16 h), utilizando borrifadores manuais para pulverizar as três folhas mais jovens e completamente expandidas (folhas +1, +2 e +3; sistema de ordenamento Kuijper) (**Figura 6**), aplicando aproximadamente 1,0 mL de solução por folha, contemplando as faces adaxial e abaxial. A quantidade aplicada de cada elemento está descrita na **Tabela 4**.

Figura 6 – Descrição das unidades experimentais e registro da pulverização foliar



Fonte: Acervo pessoal.

Tabela 4 – Quantidade de elementos aplicados usando 1,0 mL de solução por folha

Tratamentos	Por folha			Por planta		
	Ni	Cl	N	Ni	Cl	N
		mg			mg	
T1	0	0	0	0	0	0
T2	0,05	0,06	0	0,15	0,18	0
T3	0,10	0,12	0	0,30	0,36	0
T4	0,20	0,24	0	0,60	0,72	0
T5	0	0	33,3	0	0	99,9
T6	0,05	0,06	33,3	0,15	0,18	99,9
T7	0,10	0,12	33,3	0,30	0,36	99,9
T8	0,20	0,24	33,3	0,60	0,72	99,9
T9	0	0	66,6	0	0	199,8
T10	0,05	0,06	66,6	0,15	0,18	199,8
T11	0,10	0,12	66,6	0,30	0,36	199,8
T12	0,20	0,24	66,6	0,60	0,72	199,8
T13	0	0	133,2	0	0	399,6
T14	0,05	0,06	133,2	0,15	0,18	399,6
T15	0,10	0,12	133,2	0,30	0,36	399,6
T16	0,20	0,24	133,2	0,60	0,72	399,6

3.2.5. *Períodos de coleta de dados*

O período de coleta foi definido com base na fenologia da cultura, considerando a fase de maior área foliar, demanda por N, incremento de biomassa de colmos (SANTOS et al., 2019; WANDERLEY et al., 2021).

As coletas de folha ocorreram em dois eventos:

Coleta 1 – Planta 1: 3 dias após aplicação foliar (APF)

Nesse momento, a maior parte da ureia já teria penetrado na folha (TRIVELIN et al., 1988), e as plantas haviam sido expostas a mais de 24 horas de luminosidade após a pulverização. A folhas foram destinadas à avaliação das variáveis bioquímica e nutricional. Também foram medidos os índices de clorofila.

Coleta 2 - Planta 2: 7 dias APF

Duas folhas foram coletadas na planta 2: a folha +1 (pulverizada) e a folha adjacente acima da folha +1 (sem pulverização), a fim de avaliar modificações no intervalo de uma semana e a ocorrência de redistribuição para folhas mais novas. Nessa coleta, o terço médio da folha foi dividido em duas partes, sendo uma destinada à análise bioquímica e a outra à análise nutricional.

Nas duas folhas foram realizadas leituras dos índices de clorofila antes da remoção das folhas. Após a coleta de dados foliares, foi realizada biometria da parte aérea na planta 2, e o material vegetal foi utilizado para avaliação de nutrientes na parte aérea.

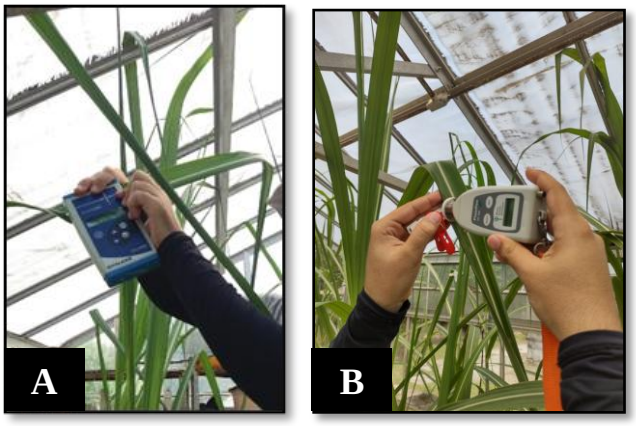
3.2.6. *Procedimentos de coleta de dados*

Índices de clorofila

Na folha +1 foram obtidos os índices de clorofila: IFC (*ClorofiLog*® CFL1030, Falker), e os índices de fluorescência da clorofila a, utilizando o fluorímetro portátil *FluorPen*® FP100 (Photon Systems Instruments) (**Figura 7**).

O IFC da clorofila total foi obtido por meio de leituras, em três pontos do terço médio da folha +1, contemplando os dois lados do limbo foliar. A fluorescência da clorofila a foi obtida por meio de leituras em um ponto do terço médio da folha +1. As leituras foram realizadas após 30 minutos da instalação das pinças de aclimatação ao escuro.

Figura 7 – Leitura do índice de clorofila (A) e fluorescência da clorofila (B) na folha +1



Fonte: Acervo pessoal.

Bioquímica

A folha +1 foi coletada usando luva descartável, e lavada com água deionizada para remover o resíduo de fertilizante nas superfícies adaxial e abaxial. Posteriormente a folha foi seca com papel toalha macio. Após a secagem, a nervura central e as extremidades (ápice e base) da folha foram descartadas, preservando os limbos do terço médio. Os limbos foram cortados em fragmentos menores, envoltos em papel alumínio e mantidos em nitrogênio líquido, até a finalização da coleta (**Figura 8**). A lâmina da tesoura foi lavada de uma parcela para outra.

Figura 8 – Procedimento de coleta de folha para análise bioquímica

Fonte: Acervo pessoal.

Biometria

A planta foi removida realizando corte rente ao solo, e então foram obtidas medidas de altura da planta (da base até a inserção da folha +1), e diâmetro e altura dos entrenós das folhas +1, +2 e +3.

Os componentes folhas secas (folhas aderidas ao colmo com menos de 50% do limbo verde), folhas verdes (folhas verdes abaixo da folha +1 e com mais de 50% do limbo verde), ponteiro (porção apical até e inclusive a folha +1) e colmo (material restante) (OLIVEIRA et al. 2010), foram separados e pesados antes e depois de secagem em estufa de circulação forçada de ar (65ºC), onde permaneceram até atingir peso constante. Ao final, foi obtida a biomassa seca (g planta^{-1}). A soma do peso de cada componente correspondeu ao peso seco da parte aérea (g planta^{-1}).

Nutrientes

A análise de nutrientes foi realizada em material vegetal seco proveniente da amostragem de folha e da biometria, na coleta 2, aos 120 DAP. Esse material foi processado em moinho de facas e peneirado em malha de 1 mm. Posteriormente, foi submetido aos procedimentos de extração seguida de determinação de N total e Ni.

3.2.7. *Determinação em laboratório*

Bioquímica

Em laboratório, as amostras foram maceradas na presença do antioxidante polivinilpirrolidona e nitrogênio líquido. O material macerado foi armazenado em *ultrafreezer* (-80 °C) até o momento das análises bioquímicas. Todas as reações bioquímicas foram realizadas utilizando água ultrapura.

Atividade da urease (EC 3.5.1.5)

A atividade da urease na folha foi determinada pela quantificação de amônio produzido pela após a amostra ser incubada com solução tampão na presença de ureia, à 30 ºC. A quantidade de amônio foi determinada pelo método colorimétrico, utilizando curva padrão (HOGAN; SWIFT; DONE, 1983; McCULLOUGH, 1967).

Amônio solúvel

O amônio solúvel na folha foi extraído após incubação a 100 ºC em água. A quantidade de amônio foi determinada pelo método colorimétrico, utilizando curva padrão (FELKER, 1977; WEATHERBURN, 1967).

Teor de ureia

A ureia na folha foi extraída por solução ácida diluída, seguida de incubação a 99 ºC. A quantidade de ureia foi determinada pelo método colorimétrico, utilizando curva padrão (KOJIMA et al., 2007).

Teor de aminoácidos totais solúveis

Os aminoácidos totais solúveis foram extraídos em solução alcoólica, seguida de incubação a 100 ºC. A quantidade aminoácidos totais foi determinada pelo método colorimétrico, utilizando curva padrão (BEZERRA-NETO; BARRETO, 2011).

Estresse oxidativo

O estresse oxidativo será avaliado pela peroxidação lipídica por meio da quantificação do teor de malondialdeído (MDA), extraído com ácido tiobarbitúrico e ácido tricloroacético e determinado pelo método colorimétrico (HEATH; PACKER, 1968).

Nutrientes

Nitrogênio total

O método utilizado foi o Kjeldahl, em que as amostras foram submetidas à digestão sulfúrica, seguida de destilação e titulação com solução ácida diluída de HCl (0,1 M). O volume de ácido utilizado na titulação corresponde ao teor de N total da amostra (SILVA, 2009).

Níquel

As amostras foram submetidas à digestão nítrico-perclórica, seguida de leitura em ICP-OS. O teor de Ni foi determinado utilizando a curva padrão (SILVA, 2009).

3.2.8. *Análise estatística*

Os dados foram analisados quanto aos critérios da análise de variância (ANOVA) e transformados quando necessário. Dados normais e/ou homocedásticos foram submetidos ao teste fatorial duplo (4x4) e, quando significativos, tiveram as médias comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). O comportamento dos dados foi avaliado por regressão linear, e os modelos selecionados de acordo com a significância dos parâmetros ($p \leq 0,05$) e coeficiente de determinação (r^2) acima de 0,50 (APÊNDICE D).

3.3. Resultados

O Ni atuou sobre a fluorescência da clorofila aos 3 dias após a pulverização foliar (APF) (**Tabela 5**). O índice Falker de clorofila a (IFCa) (**Tabela 5**), teor de amônio solúvel na folha +1 (F+1) (**Tabela 6**), entrenós das folhas +1 e +2 (**Tabela 7**), e teor total de N e Ni na parte aérea (**Tabela 8**), e foram modificados pela interação Ni+ureia, aos 7 dias APF. A atividade da enzima urease, teor de aminoácidos solúveis e de ureia foram modificados apenas pela dose de ureia nos dois momentos de coleta (**Tabela 6**).

O estresse quantificado pelo teor de malondialdeído (MDA) apresentou teor médio de 3,6 nmol g^{-1} MF, sem efeito dos tratamentos nos períodos avaliados (**Tabela 6**).

Tabela 5 - Análise de variância dos índices de clorofila a da folha da cana-de-açúcar, após a pulverização foliar de Ni e ureia

Fator	Fluorescência				Índice Falker
	F0	**Fv/F0**	**Fv/Fm**	**φEo**	**IFCa**
	3 dias APF – folha +1				
Ni	**4,93****	**3,35****	**3,86****	**3,05****	1,27^{ns}
U	0,03^{ns}	1,08^{ns}	0,71^{ns}	0,97^{ns}	0,61^{ns}
Ni*U	1,30^{ns}	1,36^{ns}	1,31^{ns}	1,37^{ns}	0,73^{ns}
CV (%)	^{1}22,0	25,36	^{2}24,8	^{3}35,9	6,9
Média	5.509	2,48	0,70	0,48	37,1
	7 dias APF – folha +1				
Ni	1,29^{ns}	1,28^{ns}	0,95^{ns}	0,43^{ns}	8,60**
U	0,47^{ns}	0,32^{ns}	0,77^{ns}	0,03^{ns}	3,58**
Ni*U	0,84^{ns}	1,74^{ns}	1,69^{ns}	0,59^{ns}	**2,67****
CV (%)	11,4	^{3}32,3	4,7	5,6	10,6
Média	5118	3,22	0,76	0,53	36,4
	7 dias APF – folha não pulverizada				
Ni	2,81^{ns}	2,65^{ns}	**3,23****	1,79^{ns}	2,24^{ns}
U	0,72^{ns}	0,15^{ns}	0,21^{ns}	1,23^{ns}	0,99^{ns}
Ni*U	1,24^{ns}	1,16^{ns}	1,06^{ns}	1,27^{ns}	0,87^{ns}
CV (%)	6,3	^{3}29,8	2,6	5,0	10,2
Média	5042	3,27	0,76	0,53	35,8

Ni: Níquel. U: ureia. F0: fluorescência inicial. Fv/F0: rendimento quântico variável. Fv/Fm: rendimento quântico máximo. φEo: rendimento quântico do transporte de elétrons. IFCa: Índice Falker de clorofila a. Dados transformados em em $^{1}x^{(-2)}$; $^{2}x^{(3,0)}$; $^{3}x^{(3,5)}$. Teste F: ^{ns}não significativo; $^{**}(p \leq 0,05)$.

Tabela 6 - Análise de variância das variáveis bioquímicas do metabolismo de ureia na folha +1 da cana-de-açúcar pulverizada com ureia e Ni

Fator	Ureia	Atividade da urease	Amônio solúvel	Aminoácidos solúveis	MDA
	mmol g^{-1} MF h^{-1}	----- µmol NH_4^+ g^{-1} MF h^{-1} -----		µmol g^{-1} MF	nmol g^{-1} MF
			3 dias APF – folha +1		
Ni	$0,37^{ns}$	$0,58^{ns}$	$1,53^{ns}$	$1,42^{ns}$	$0,03^{ns}$
U	$\mathbf{5,54}^{**}$	$\mathbf{3,69}^{**}$	$14,68^{**}$	$\mathbf{14,51}^{**}$	$1,03^{ns}$
Ni*U	$1,47^{ns}$	$1,54^{ns}$	$\mathbf{2,45}^{**}$	$1,47^{ns}$	$0,84^{ns}$
CV (%)	$^{2}20,1$	$^{1}31,2$	$^{2}53,8$	$^{3}37,2$	30,6
Média	0,28	8,5	11,1	17,6	4,11
			7 dias APF – folha +1		
Ni	$2,81^{ns}$	$0,89^{ns}$	$5,10^{**}$	$0,95^{ns}$	$1,68^{ns}$
U	$\mathbf{3,94}^{**}$	$\mathbf{8,63}^{**}$	$4,37^{**}$	$\mathbf{12,65}^{**}$	$1,44^{ns}$
Ni*U	$1,75^{ns}$	$0,77^{ns}$	$\mathbf{2,86}^{**}$	$1,13^{ns}$	$1,55^{ns}$
CV (%)	$^{2}17,9$	$^{1}26,4$	$^{2}71,8$	$^{2}29,8$	23,1
Média	0,26	8,7	4,1	9,3	3,8
			7 dias APF – folha não pulverizada		
Ni	$1,15^{ns}$	$0,59^{ns}$	-	$0,76^{ns}$	$1,35^{ns}$
U	$1,36^{ns}$	$2,10^{ns}$	-	$0,32^{ns}$	$0,82^{ns}$
Ni*U	$0,60^{ns}$	$1,22^{ns}$	-	$1,47^{ns}$	$0,16^{ns}$
CV (%)	$^{2}4,8$	$^{3}27,5$	-	43,6	36,9
Média	0,03	6,5	-	5,7	3,0

Ni: Níquel. U: ureia. Teste F: ^{ns}não significativo; $^{**}(p \leq 0,05)$. Dados transformados em ^{1}log10; $^{2}\sqrt{(x+1)}$; $^{3}(\sqrt{x^{-1}})$.

Tabela 7 - Análise de variância da biometria da cana-de-açúcar, aos 7 dias após a pulverização foliar de Ni e ureia (120 DAP)

Fator	ALT	Folha +1		Folha +2		Folha +3		MSPA
		Diam.	Comp.	Diam.	Comp.	Diam.	Comp.	
	m	---------- cm ----------						g $planta^{-1}$
Ni	$0,45^{ns}$	$1,29^{ns}$	$\mathbf{4,12}^{**}$	$1,74^{ns}$	$0,13^{ns}$	$0,07^{ns}$	$0,51^{ns}$	$0,08^{ns}$
U	$0,99^{ns}$	$1,48^{ns}$	$2,06^{ns}$	$0,64^{ns}$	$1,31^{ns}$	$1,11^{ns}$	$0,47^{ns}$	$1,65^{ns}$
Ni*U	$0,66^{ns}$	$1,61^{ns}$	$\mathbf{3,23}^{**}$	$\mathbf{3,01}^{**}$	$1,08^{ns}$	$1,12^{ns}$	$0,67^{ns}$	$1,14^{ns}$
CV (%)	9,3	15,0	34,1	8,6	$^{1}20,3$	$^{2}20,9$	13,5	12,0
Média	1,2	1,8	8,2	2,4	13,4	2,6	13,6	146,0

Ni: Níquel. U: ureia. Diam.: diâmetro. Comp.: comprimento. MSPA: massa seca da parte aérea. DAP: dias após o plantio. Teste F: ^{ns}não significativo; significativo a $^{**}(p \leq 0,05)$. Dados transformados em $^{1}\sqrt{x^{3}}$; $^{2}x^{3}$.

Tabela 8 - Análise de variância do teor de Ni e N na biomassa seca da parte aérea da cana-de-açúcar, aos 7 dias após a pulverização foliar de Ni e ureia (120 DAP)

Fator	Ni	N total
	mg kg^{-1}	g kg^{-1}
Ni	$2,79^{ns}$	$3,60^{**}$
U	$2,21^{ns}$	$45,65^{**}$
Ni*U	$\mathbf{3,58}^{**}$	$\mathbf{4,16}^{**}$
CV (%)	35,6	9,5
Média	15,4	9,5

Ni: Níquel. U: ureia. DAP: dias após o plantio. Teste F: ^{ns}não significativo; significativo a $^{**}(p \leq 0,05)$.

3.3.1. *Bioquímica do metabolismo da ureia*

Atividade da urease (AU)

Aos 3 dias APF, a pulverização com ureia (7 % de ureia) aumentou a atividade de urease (AU) em 103 % em relação ao controle (**Figura 9 - A**).

Aos 7 dias APF, a AU superou o controle com a dose 14 % de ureia, com aumento de 117 % (**Figura 9 - B**). O aumento da dose não aumentou a atividade da enzima nos dois momentos de coleta, que se manteve com média 9,62 µmol NH_4^+ g^{-1} h^{-1} aos 3 APF e 10 µmol NH_4^+ g^{-1} h^{-1} aos 7 APF, na folha +1.

Teor de ureia (TU)

Aos 3 dias APF, o teor de ureia (TU) na folha +1 foi modificado apenas pela dose 29 % de ureia, cuja média (0,48 mmol g^{-1} MF h^{-1} de ureia) foi 183 % superior ao teor obtido com a dose 14 % de ureia (**Figura 9** – **C**).

Aos 7 dias APF, o TU obtido com a dose 29 % de ureia atingiu 1,52 mmol g^{-1} MF h^{-1}, valor 1,5 vezes maior que à coleta realizada aos 3 dias APF. A dose 14 % de ureia também aumentou entre as coletas, sendo três vezes maior aos 7 dias APF, quando não diferiu da dose 29 % de ureia (**Figura 9 - D**).

Teor de amônio solúvel (AS)

Aos 3 dias APF, a dose 14 % de ureia sem Ni aumentou o teor de amônio solúvel (AS) em relação ao controle. Essa dose de ureia apresentou o teor máximo de AS (31,75 µmol g^{-1} MF h^{-1}). O aumento da concentração de ureia aumentou o teor de AS (**Figura 10 – A**).

Aos 7 dias APF, o teor de AS aumentou a partir da dose de 14 % de ureia, com média de 19,6 µmol g^{-1} MF h^{-1}. Na interação 29 % ureia + Ni, o aumento da dose de Ni reduziu o teor de AS, chegando à redução de 96 % com 3,41 mM de Ni (**Figura 10 – B**).

Teor de aminoácidos solúveis (AA)

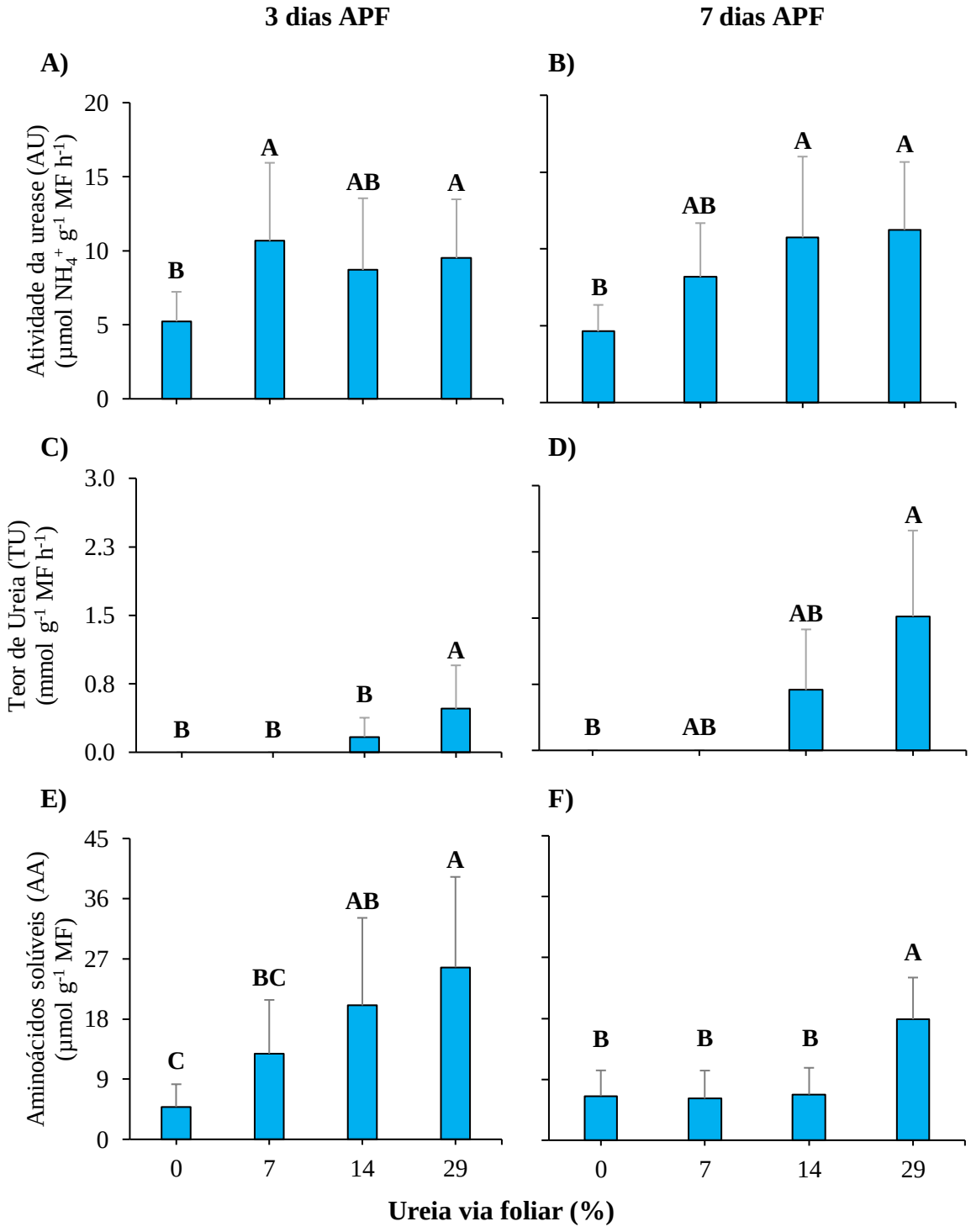
Aos 3 dias APF, o teor de aminoácidos solúveis (AA) foi crescente com o aumento da dose de ureia. Enquanto a dose 7 % de ureia não diferiu do controle, a dose 14 % de ureia aumentou o teor de AA e não diferiu de 29 % de ureia. O teor médio de AA para essas doses foi de 25,6 µmol g^{-1} MF, o que representa aumento de 422 vezes em relação ao controle (**Figura 9 – E**).

Aos 7 dias APF, apenas a dose 29 % de ureia apresentou aumento de AA (17,9 µmol g^{-1} MF), superando em 105 % o controle (**Figura 9 – F**).

Folha não pulverizada

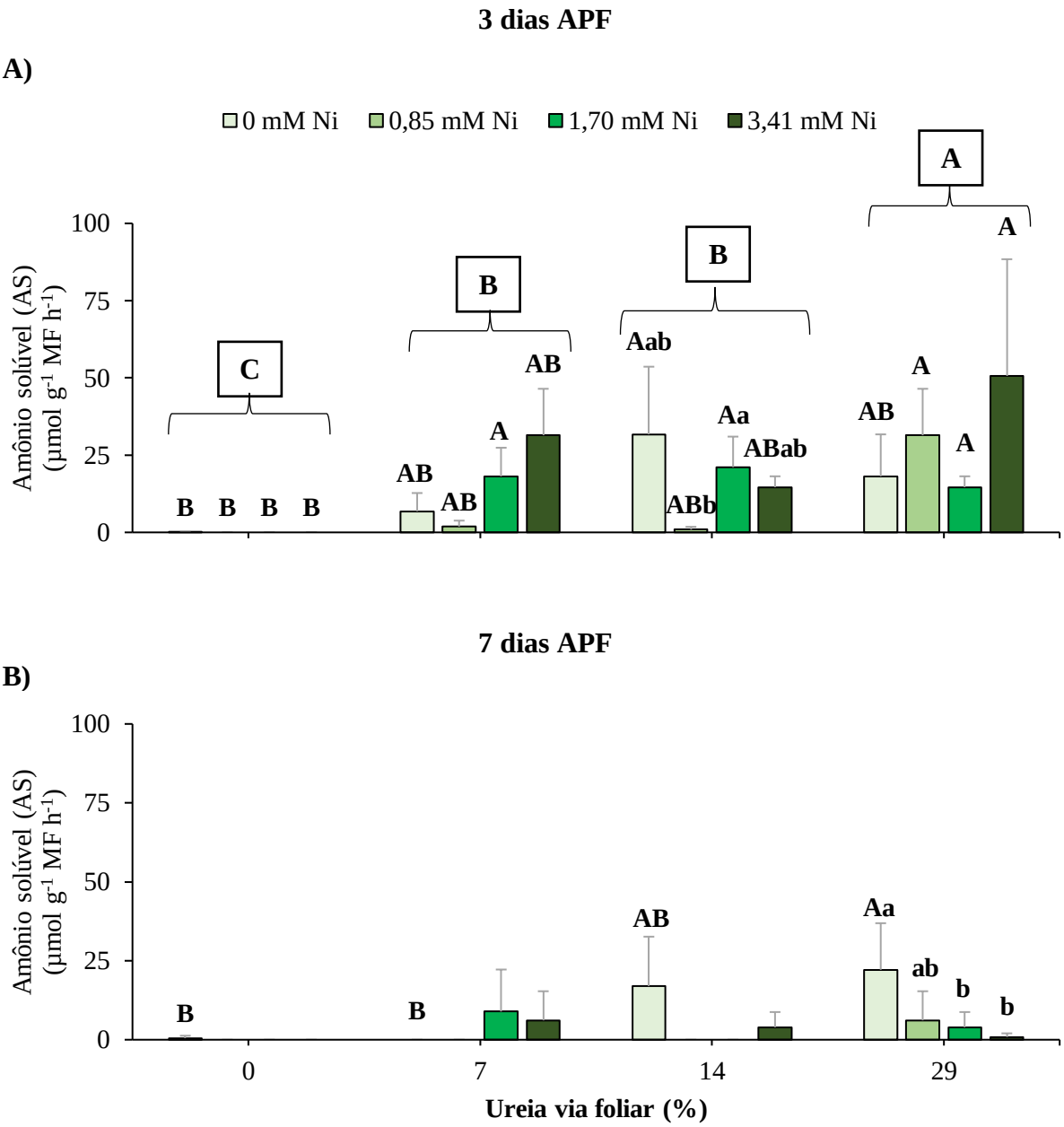
Não houve efeito da pulverização com ureia e Ni sobre o metabolismo de ureia na folha não pulverizada avaliada aos 7 dias APF.

Figura 9 – Metabolismo de ureia na folha +1 da cana-de-açúcar, após a pulverização foliar de Ni e ureia



Médias seguidas da mesma letra maiúscula entre as doses de ureia e minúscula entre as doses de Ni, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Figura 10 – Teor de amônio solúvel na folha +1 da cana-de-açúcar, após a pulverização foliar de Ni e ureia



Médias seguidas da mesma letra maiúscula entre as doses de ureia e minúscula entre as doses de Ni, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

3.3.2. *Índices de clorofila a*

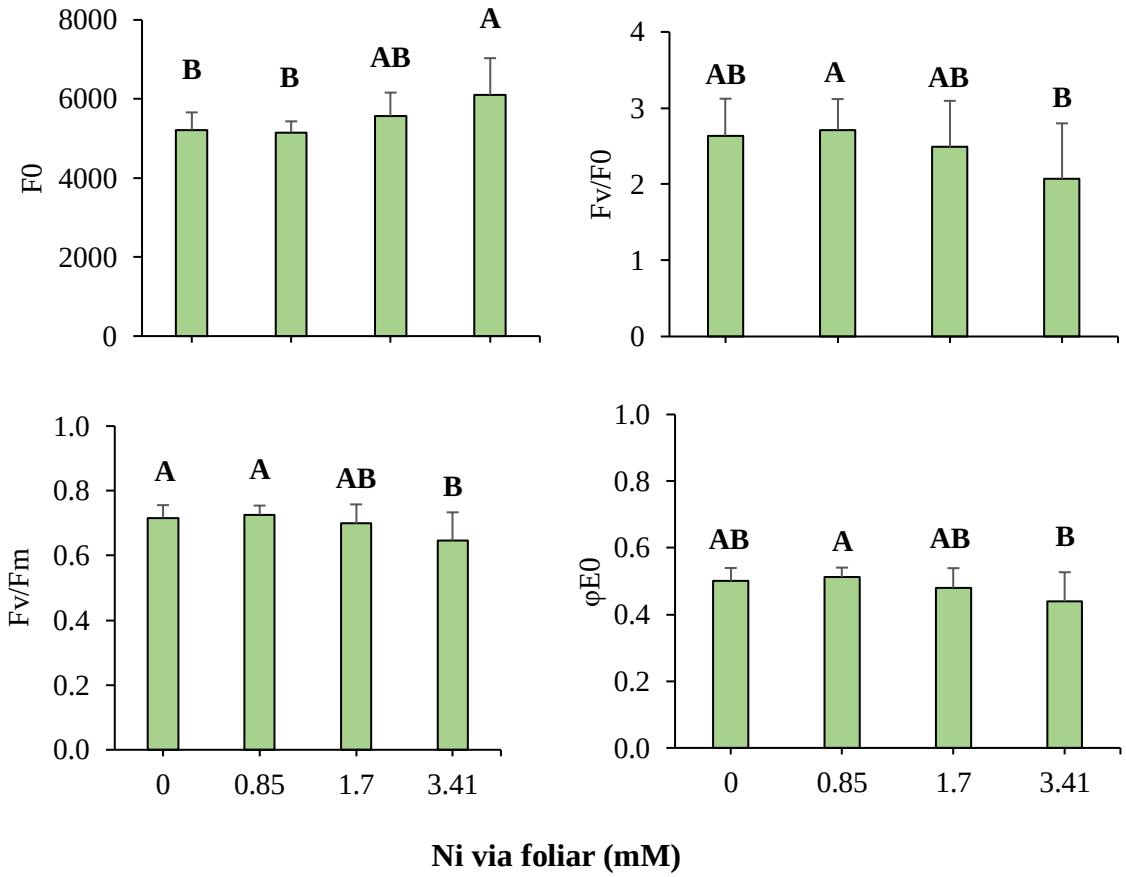
Fluorescência da clorofila a

Aos 3 dias APF, a dose 3,41 mM de Ni aumentou a fluorescência inicial (F0), reduziu os rendimentos quânticos variável (Fv/F0) e máximo (Fv/Fm), e o transporte de elétrons (φEo), em relação ao controle (**Figura 11**).

Aos 7 dias APF, não houve efeito da pulverização sobre tais índices (**Tabela 5**).

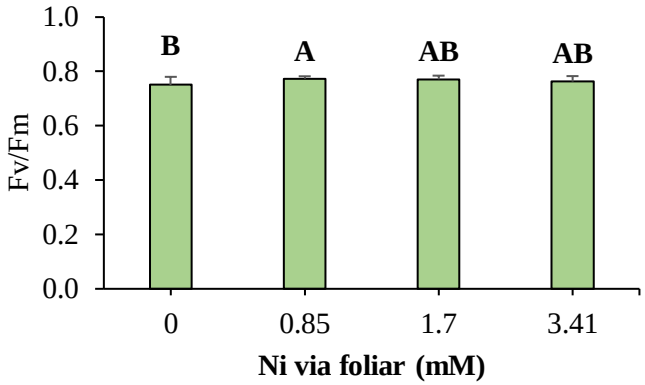
Na folha não pulverizada, a dose 0,85 mM de Ni promoveu aumento do Fv/Fm em relação ao controle (**Figura 12**). Os demais índices não foram modificados pelos tratamentos, cujas médias foram semelhantes às obtidas na folha +1 aos 7 dias APF (**Tabela 5**).

Figura 11 – Índices de fluorescência da clorofila a na folha +1 de cana-de-açúcar, aos 3 dias após a pulverização foliar de Ni e ureia



F0: fluorescência inicial. Fv/F0: rendimento quântico relativo. Fv/Fm: rendimento quântico máximo potencial. φEo: rendimento quântico do transporte de elétrons. Médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Figura 12 – Rendimento quântico máximo (Fv/Fm) do fotossistema II da folha não pulverizada da cana-de-açúcar, aos 7 dias após a pulverização foliar de Ni e ureia.



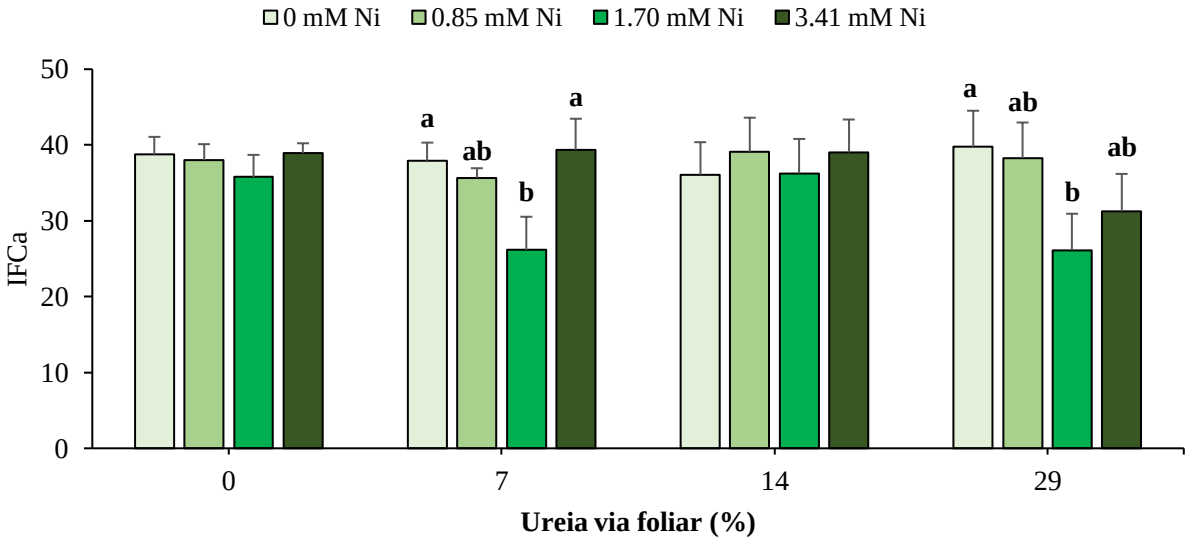
Médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Índice Falker de clorofila a (IFCa)

Aos 3 dias APF, o IFCa se manteve com média de 37, independente dos tratamentos de pulverização (**Tabela 5**).

Aos 7 dias APF, não houve diferença entre as doses de ureia sobre o IFCa, embora tenha sido indicsds pela ANOVA (**Tabela 5**). Já dose de 1,70 mM de Ni combinada com 7 % e 29 % de ureia apresentou IFCa médio de 26, o que corresponde à redução 28 % em relação ao controle (**Figura 13**).

Figura 13 - Índice Falker de clorofila a (IFCa) na folha +1 da cana-de-açúcar, aos 7 dias após a pulverização foliar de Ni e ureia



Médias seguidas da mesma letra maiúscula entre as doses de ureia e minúscula entre as doses de Ni, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Folha não pulverizada

Não houve efeito da pulverização com ureia e Ni sobre o IFCa na folha não pulverizada avaliada aos 7 dias APF, cuja média foi de 35,8 (**Tabela 5**).

3.3.3. *Biometria*

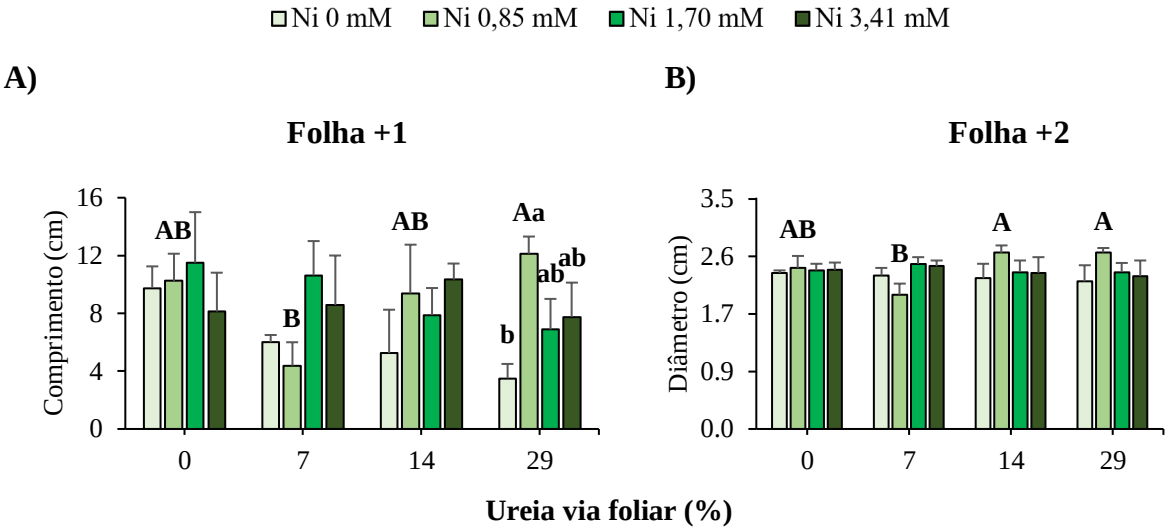
Aos 7 dias APF, a combinação 0,85 mM de Ni + 7 % de ureia apresentou menor comprimento do entrenó da folha +1, em relação a combinação dessa dose de Ni com 29 % de ureia. A combinação 0,85 mM de Ni + 29 % de ureia apresentou o máximo comprimento do entrenó (12 cm), superando em 200 % a pulverização isolada de ureia 29 % (**Figura 14 - A**).

A combinação 0,85 mM de Ni + 7 % de ureia resultou em entrenó da folha +2 mais fino, com redução de 30 % em relação à combinação dessa dose de Ni com doses maiores de ureia (14 % ou 29 % de ureia) (**Figura 14 - B**).

As variáveis altura da planta, e produção de biomassa de folhas e colmos, bem como para produção de biomassa total não foram modificadas pelos tratamentos, como indicado pela ANOVA (**Tabela 7**). Ao avaliar tais variáveis de crescimento em curvas de regressão, os modelos apresentaram r^2 acima de 0,70 em função da pulverização isolada de Ni e de ureia (APÊNDICE D). As doses de Ni promoveram ganhos lineares para altura da planta, massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca de folhas (MSFO), com ganhos máximos de 2 %, 16 % e 14 %, respectivamente, em relação ao controle. Os ajustes foram quadráticos para as variáveis massa seca de colmos (MSCO) e diâmetro do entrenó da folha +1, cujos ganhos máximos foram de 26 % com dose 2,56 mM de Ni, e 17 % com dose de 2,02 mM de Ni, respectivamente, em relação ao controle.

As doses de ureia promoveram ganhos lineares para MSPA, MSCO, e diâmetro do entrenó da folha +3, com ganhos máximos de 16 %, 50 % e 4 %, respectivamente, em relação ao controle. A MSFO apresentou ajuste quadrático, com ganho máximo de 11 % com dose 19 % de ureia, em relação ao controle. Não houve efeito da ureia sobre a altura da planta, cuja média foi de 1,16 m.

Figura 14 - Biometria dos entrenós da cana-de-açúcar, aos 7 dias após a pulverização foliar de Ni e ureia



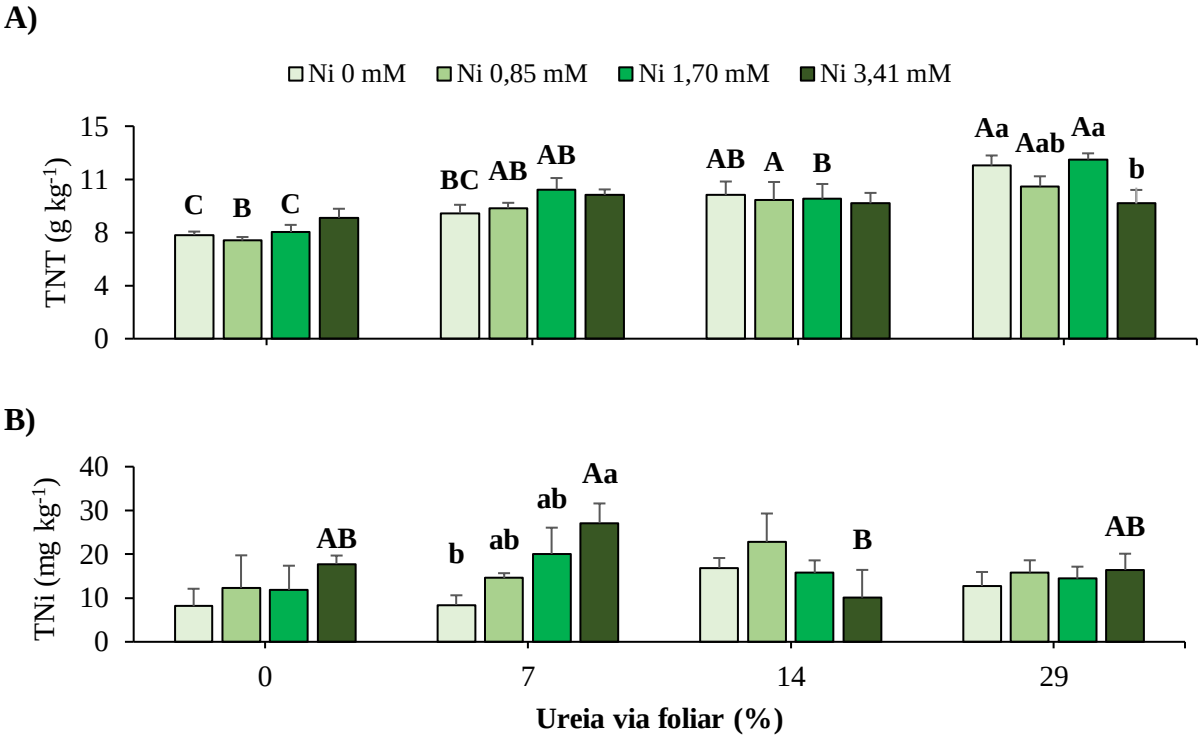
Médias seguidas da mesma letra maiúscula entre as doses de ureia e minúscula entre as doses de Ni, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

3.3.4. *Teor total de Ni e N na biomassa seca da parte aérea*

Doses crescentes de ureia promoveram aumento de 20 % no teor de N total (TNT) na biomassa seca da parte aérea a partir de 14 % de ureia sem Ni, e de 35 % para 1,70 mM de Ni + 14 % de ureia, em relação ao controle (**Figura 15 - A**). A dose 29 % de ureia + 3,41 mM de Ni reduziu o TNT em 27 % em relação ao controle. A pulverização de 1,70 mM de Ni + 7 % de ureia aumentou o TNT em 33 % em relação à pulverização isolada dessa dose de Ni, e não diferiu da combinação dessa dose com 14 % e 29 % de ureia.

O aumento do teor total de Ni (TNi) na biomassa seca da parte aérea ocorreu somente na combinação de Ni+ureia (**Tabela 8**). A adição de ureia 7 % à calda de pulverização com Ni resultou no teor médio de 27 mg kg^{-1} de Ni. O TNi máximo ocorreu na combinação 3,41 mM de Ni + 7 % de ureia, o que correspondeu ao aumento de 237 % em relação ao controle (**Figura 15 - B**). O aumento da dose de ureia não modificou o TNi na parte aérea.

Figura 15 – Teor de nutrientes biomassa seca da parte aérea da cana-de-açúcar, aos 7 dias após a pulverização foliar de ureia e Ni.



TNT (Teor total de N). TNi (Teor total de Ni). Médias seguidas da mesma letra maiúscula entre as doses de ureia e minúscula entre as doses de Ni, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

3.4. Discussão

No momento da aplicação foliar, foi observado que o adjuvante não promoveu o espalhamento da gota. O que, associado à alta temperatura da casa de vegetação na maior parte do dia, condiciona o aumento da concentração do soluto, gerando dano ao tecido abaixo da gota (CASTRO et al., 2022; 2023). Após 3 dias, as folhas da cana-de-açúcar pulverizadas com ureia apresentaram manchas cloróticas dispersas no limbo foliar, com diferentes formas e tamanhos (APÊNDICE B). As queimas de maior intensidade ocorreram no ápice e margem das folhas, devido ao fluxo transpiratório dos solutos (CASTRO et al., 2022).

Nos tratamentos com dose 29 % de ureia ocorreu escurecimento das margens das folhas desde 24 horas APF, evoluindo para clorose, seguida de queima (APÊNDICE B – 1 e 2). Após aplicação foliar de ureia com dose alta e sem uso de adjuvante, Castro et al. (2022; 2023) também identificaram surgimento de dano foliar nas primeiras 24 horas APF em cana-de-açúcar e trigo.

A aplicação isolada de 3,41 mM de Ni promoveu dano na forma de pontos necróticos, observado aos 7 dias APF (APÊNDICE B - 2), também evidenciando o não espalhamento da gota e o efeito negativo da concentração do sal na superfície da folha.

A avaliação visual mostrou menor ocorrência de danos foliares quando a combinação Ni+ureia, nas doses crescentes de ureia, combinadas com 0,85 mM de Ni e 3,41 mM de Ni (APÊNDICE C). De forma semelhante, a adição de Ni na nutrição da soja reduziu o percentual de clorose das folhas após pulverização foliar de ureia (KUTMAN; KUTMAN; CAKMAK, 2013). Isso reforça o potencial de Ni na redução dos danos causados pela pulverização com ureia.

Os efeitos da pulverização foliar ocorreram de forma predominante na folha pulverizada, principalmente em resposta à ureia. Apenas os índices de fluorescência da clorofila a não foram afetados pela pulverização com ureia, tendo sido modificados apenas pela pulverização com Ni (**Tabela 5 e Tabela 6**).

Na cana-de-açúcar, Castro et al. (2023) identificou que, aos 20 dias APF, a maior parte (41 %) do N da ureia pulverizada nas folhas permanece na folha tratada. Na remobilização, o N-fertilizante é direcionado preferencialmente para o colmo (15 %), folhas novas (8,6 %), raízes (4,3 %), e a menor parte para folhas velhas (1,3 %). Depois do colmo, a porção que recebe mais N da pulverização são as folhas jovens, e as folhas não expandidas mostraram demandar mais N (7,2 %). Folhas jovens expandidas receberam cerca de 6 vezes menos N-fertilizante (1,4 %). Isso pode explicar a ausência de efeito da pulverização foliar de ureia sobre o metabolismo de N na folha zero, que se trata de uma folha expandida.

3.4.1. *Metabolismo de ureia na cana-de-açúcar*

A pulverização com ureia foi o fator que aumentou a atividade da urease (AU) (**Figura 9 – A e B**). A máxima AU (9,81 µmol NH_4^+ g^{-1} h^{-1}) foi obtida pela dose 7 % de ureia. Embora o aumento da dose de ureia não tenha aumentado AU, as doses 14 % e 29 % de ureia mantiveram a AU máxima até 7 dias APF, enquanto a dose 7 % de ureia não diferiu do controle.

A manutenção do nível máximo de AU aos 7 dias APF, associado ao aumento do teor de ureia (TU) em pelo menos 1,5 vezes em relação aos 3 dias APF (**Figura 9 – C, D**), mostra que ureia pulverizada levou 7 dias para ser absorvida pela folha. Avaliando a pulverização foliar de ureia, Castro et al. (2022; 2023) observaram que o N foi absorvido em taxa crescente nos primeiros 5 dias APF, independente do uso de adjuvante. Os maiores TU foram obtidos com as doses 14 % e 29 % de ureia, aos 7 dias APF, com médias cerca de 3 vezes maiores que às obtidas aos 3 dias APF (**Figura 9 – C, D**). Isso indica que a ureia continuou sendo absorvida até 7 dias, e foi acumulada no tecido após a atividade da urease chegar ao máximo. Segundo Castro et al. (2023), na cana-de-açúcar, o N continua sendo absorvido pela folha até 20 dias APF, com menor taxa, totalizando recuperação média de 65 %, e o aumento da dose não aumentou a recuperação. No estudo de Andrade et al. (2024), a mudança na dose também não modificou a recuperação da ureia pulverizada nas folhas de cana-de-açúcar. Isso reforça que absorção é dirigida pela planta (FERNANDÉZ; GIL-PELEGRÍN; EICHERT, 2021).

Apesar da ausência de Ni no manejo nutricional da planta, o teor de Ni presente no colmo-semente supriu a demanda da AU até os 120 DAP, uma vez que a adição de Ni via folha não alterou a AU, mesmo quando o teor de ureia na folha aumentou. Oliveira, Lavres e van der Ent (2021), obtiveram aumento da AU aos 4 dias APF de Ni, e aos 10 dias APF a atividade foi reduzida. Nesse estudo as plantas pulverizadas estavam deficientes de Ni, com sintomas visuais característicos. Isso sugere que o teor de Ni das sementes utilizadas no presente estudo podem ser considerados acima da faixa de deficiência de Ni na cana-de-açúcar. Plantas sem pulverização de Ni apresentaram teor médio de 12 mg kg^{-1} de Ni na parte aérea (**Figura 15**).

A evidência da metabolização da ureia absorvida foi o aumento crescente do teor de aminoácidos (AA) nos dois momentos de avaliação (**Figura 9 – E**). Aos 7 dias APF, quando a dose 29 % de ureia ainda apresentava máxima AU, a ureia continuou sendo assimilada em aminoácidos, que se manteve alto (**Figura 9 – F**). O teor de amônio (AS) também evidencia a metabolização, uma vez que folhas pulverizadas com ureia apresentaram teor de AS maior que o controle, com máximo foi obtido com a maior dose de ureia (**Figura 10 – A e B**) (CASTRO et al., 2022).

Após 7 dias, houve redução dos valores médios de AS e AA (**Figuras 9 e 10**), em relação aos valores obtidos aos 3 dias APF, em 175 % e 89 %, respectivamente. Isso indica consumo de amônio para formação de aminoácidos, e utilização dos aminoácidos para síntese de proteínas e moléculas não proteicas (FABIANO, 2019). A redução também pode ser devido à remobilização desses compostos para outras partes da planta. No presente estudo, amônio e aminoácidos quantificados se referem à porção solúvel, ainda não utilizada pelo metabolismo da planta (CASTRO et al., 2022; 2023; TRIVELLIN et al., 1988).

O aumento da dose de Ni em combinação com a dose 29 % de ureia promoveu redução de AS, o que pode ser explicado pela ocorrência de atividade da urease ainda na superfície da folha (CASTRO et al., 2023; WANG et al., 2008). No estudo de Castro et al. (2023), a recuperação da ureia pulverizada na cana-de-açúcar foi 74 % na dose 8 % de ureia e de 54 % na dose 32 % de ureia, o que corresponde à redução de 37 % no aproveitamento do fertilizante. A explicação para esse resultado é a perda por volatilização de NH_3, formada após hidrólise da ureia antes de entrar na célula. O pH elevado pela alta concentração de ureia na solução favorece a atividade da urease, presente na membrana das células de plantas e microbiota da filosfera (CAMBUÍ; GASPAR; MERCIER, 2009; BASHIR et al., 2022; HOULT; MCGARITY, 1989; VLEK; STUMPE, 1978). A volatilização da ureia-fertilizante aplicada na folha também foi verificada nos estudos de Wesely et al. (1987) e Schlossberg, Mcgraw e Sebring (2018). Em pH alcalino a concentração de prótons de H^+ é baixa, o que reduz a protonação da NH_3, que é perdida para atmosfera pelo processo de volatilização (WESELY et al., 1987). Quando o Ni está presente, isso pode ser intensificado, uma vez que estimula a AU (RAMPAZZO et al., 2022).

O aumento da dose de ureia resultou no aumento do pH da calda, chegando à média de 8,8 na dose 29 % de ureia (**Tabela 3**). O monitoramento do ambiente da casa de vegetação registrou picos de temperatura de 40 ºC e umidade relativa do ar abaixo de 20 % (**Figura 4**). Tais condições favorecem a perda de umidade e aumento da concentração de ureia na gota, e aumento da volatilização de NH_3 na superfície da folha. Essa perda seria intensificada pela ureia ainda presente na superfície após 3 dias APF, que pode ter menor taxa de absorção, ficando mais propensa a ser perdida por volatilização. Castro et al. (2023) identificaram que após 5 dias APF, a taxa de absorção reduz, principalmente com o aumento da dose de ureia foliar.

3.4.2. *Avaliação do estresse*

Os estresses que acometem as plantas, sejam eles de natureza biótica (ex. patógenos) ou abiótica (ex. déficit hídrico ou nutricional), resultam na produção de espécies reativas de oxigênio (EROs). O nível de estresse da planta pode variar de acordo com a intensidade/severidade e com a duração do estresse. EROs podem comprometer reações bioquímicas e estruturas celulares, como os danos sobre a membrana de organelas e membrana celular. Em resposta ao estresse, a planta ativa o sistema de defesa, com mecanismos enzimáticos e não enzimáticos (RAJPUT et al., 2021).

Estresses severos e/ou atuantes por tempo suficientemente longo, resultam no acúmulo de malondialdeído (MDA), produto da peroxidação de lipídeos das membranas por EROs. A quantificação de MDA funciona como marcador metabólico de estresse oxidativo severo em plantas (RAMPAZZO et al., 2022; TEIXEIRA et al., 2022; ZENG et al., 2019).

Os tratamentos apresentaram teores de MDA semelhantes ao controle em todas as avaliações, apesar da ocorrência de danos foliares (**Tabela 6**). Tais danos ocorreram na porção apical-marginal das folhas tratadas com dose alta de ureia, tendo iniciado nas primeiras 24 horas APF (APÊNDICE B), como foi também observada por Castro et al. (2023).

A amostragem para quantificação do MDA ocorreu no terço médio, onde os danos foram menos intensos. Rampazzo et al. (2019) e Teixeira et al. (2022) verificaram médias menores do que 4,0 nmol g^{-1} MF de MDA, tanto tratamentos controle quanto em tratamentos que apresentaram intensa atividade das enzimas do complexo antioxidante. Isso indica que as médias de MDA obtidas no presente estudo (**Tabela 6**) correspondem à baixo nível de estresse, não chegando a comprometer a estabilidade das membranas.

Em meio com alto teor de AS, a assimilação de amônio é direcionada para a formação de glutamina, resultado da alta afinidade da glutamina sintetase (GS) por amônio. Nessa condição, a rápida assimilação em glutamina funciona como antiestresse (CASTRO et al., 2022). Isso pode ter ocorrido na condição da dose 29 % de ureia (**Figura 10**), que não mostrou acúmulo de MDA (**Tabela 6**).

Outra variável com alta sensibilidade à ocorrência de estresses na planta é a cinética da fluorescência da clorofila a, que consiste na avaliação não destrutiva que permite identificar distúrbios metabólicos antes da manifestação na forma de sintomas. No pleno funcionamento da fotossíntese, cada planta apresenta um padrão de perda de energia na forma de fluorescência, emitida quase que totalmente pela clorofila a. A fluorescência reflete a capacidade de captação de luz, dissipação e transferência de energia, até a fixação de carbono. Mudanças nesse padrão implicam na alteração do processo fotossintético como um todo, com alta precisão e

sensibilidade (BAKER, 2008). Na cana-de-açúcar, o padrão de fluorescência e a alteração promovida por tratamentos ocorre de forma semelhante entre variedades e espécies (DIAS et al., 2024; TEIXEIRA et al., 2022).

O efeito negativo sobre a fluorescência foi causando pelo Ni em excesso, cujo dano no aparato fotossintético é conhecido (HASSAN et al., 2019). O Ni se acumula no citosol e cloroplastos, substituindo outros íons-chave na estrutura de moléculas, como as clorofilas. Também estimulam a formação de EROs, que comprometem a estrutura de moléculas com funções metabólicas e estruturais, como proteínas e lipídeos. Como consequência, os processos bioquímicos como um todo são afetados, levando à anomalias anatômicas e morfológicas (SHAHZAD et al., 2018).

Aos 3 dias APF, a pulverização com dose 3,41 mM de Ni danificou a fluorescência inicial (F0), cujo aumento implica na perda de regulação da captação de energia, captando energia além do que o complexo antena é capaz de processar. Como consequência, ocorre redução da energia disponível para ser utilizada pelo fotossistema II (PSII) (Fv/Fm), da energia efetiva utilizada pelo PSII (Fv/F0), e da eficiência de conversão da energia luminosa em energia química (φEo) (**Figura 11**). Dias et al. (2024) observaram o mesmo comportamento dos índices de cana-de-açúcar sob estresse.

A severidade e tempo de exposição à mudança ambiental (ou manejo) pode tornar o dano no aparato fotossintético irreversível, quando há ausência de resposta aos estímulos luminosos (fotoinibição). Quando os danos são reversíveis funcionam como ajuste metabólico induzido para proteger o centro de reação de danos mais severos (BAKER, 2008). A pulverização ocorreu apenas uma vez, e após 7 dias não houve efeito dos tratamentos na folha +1, caracterizando o dano pela dose 3,41 mM de Ni como reversível (**Tabela 5**). A alta mobilidade do Ni na planta permite o seu deslocamento para outros órgãos (OLIVEIRA; LAVRES; VAN DER ENT, 2021; YUSUF et al., 2011), o que reduz o tempo de exposição da folha +1 à alta concentração de Ni. Além disso, aos 7 dias APF, os teores de AS foram reduzidos, e as doses 1,37 mM e 3,41 mM de Ni associado com a dose 29 % de ureia reduziu o AS em relação à não aplicação de Ni (**Figura 10**).

O efeito do Ni na folha zero aos 7 dias APF evidencia a translocação de Ni, promovendo aumento da energia disponível para a fotossíntese (Fv/Fm) na folha não pulverizada (**Figura 12**). Em doses baixas, o Ni estimula o metabolismo de N, fotossíntese e mecanismos de defesa, o que resulta no crescimento das plantas (SHAHZAD et al., 2018; ZHANG et al., 2022). A translocação do Ni pulverizado na folha para partes mais novas da planta foi identificada também por Oliveira, Lavres e van der Ent (2021).

As doses de ureia não modificaram a fluorescência da clorofila a, mesmo com maior intensidade de queima foliar nas plantas que receberam as doses de 14 % e 29 % de ureia. Os teores foliares máximos foram de 1,52 mmol g^{-1} MF h^{-1} de ureia e 31,75 µmol g^{-1} MF h^{-1} de amônio (**Figura 9 – C, D**; **Figura 10**). A ureia acumulada pode ser armazenada no vacúolo, reduzindo a possibilidade de danos (WANG et al., 2008). Já o amônio permanece no citosol ou citoplasma, valores acima de 10 µmol g^{-1} MF h^{-1} estão associados com danos fisiológicos e morfológicos (CASTRO et al.,2022; HACHIYA et al., 2021). Assim, os valores obtidos no presente estudo são considerados altos e são associados à danos foliares também em outros grupos de planta (CASTRO et al., 2022; HACHIYA et al., 2021; JIAN et al., 2018).

Plantas consideradas sensíveis ao acúmulo de amônio apresentam alta atividade de glutamina sintetase 2 (GS2, no plastídio) além da atividade da GS1 (no citosol), para formar glutamina. A GS2 tem atividade predominante na folha (SHILPHA; SONG; JEONG, 2023) e produz mais prótons durante essa reação do que a GS1, acidificando o meio mais rapidamente. Quando a célula apresenta alto teor de amônio, a GS2 é estimulada e sua atividade desencadeia o mecanismo de defesa contra o estresse ácido. Essas enzimas realizam a assimilação do amônio de forma rápida, causando desbalanço da relação glutamina/glutamato (Gln/Glu), uma vez que a atividade da GOGAT para síntese de glutamato, que consome prótons, é mais lenta (BITTSÁNSZKY et al., 2015; HACHIYA et al., 2021).

Segundo Fabiano (2019), na combinação de ureia e Ni, a aplicação de ureia foi o fator de estímulo da expressão gênica da GS2, em plantas tratadas com ureia foliar, e não o Ni. Esse aumento foi acompanhado do estímulo da defesa vegetal, como atividade de enzimas de estresse e produção de aminoácidos relacionados com senescência, como as poliaminas. E a expressão dos genes da GOGAT não foi estimulada pelos tratamentos.

Em trigo, Castro et al. (2022) relataram elevados teores de amônio (> 300 µmol g^{-1} MF h^{-1}) em plantas que receberam alta dose de N foliar. Essas plantas também apresentaram senescência precoce de folhas e redução da atividade da GS, principalmente a GS2. O estudo também relata que houve alta produção de asparagina, um aminoácido utilizado como reserva e remobilização de N. A redução da atividade das GS foi apontada como estratégia para reduzir o estresse ácido resultante do aumento da relação Gln/Glu em condição de acúmulo de amônio solúvel no tecido (HACHIYA et al., 2021). Essa pode ser uma estratégia de tolerância ao amônio em plantas C4, reduzindo a resposta na forma de estresse (BOSCHIERO et al., 2019; CIPRIANO et al., 2021).

A cana-de-açúcar apresenta sintomas de toxidez por amônia quando tratada com ureia foliar (CASTRO et al., 2023; ANDRADE et al., 2024). Plantas que toleram amônio apresentam

mecanismos de proteção, como a compartimentalização em vacúolo e nas raízes, eficiente mecanismo de transporte e assimilação, rotas alternativas de assimilação (como via transaminases e GDH), mecanismos de regulação de pH do apoplasto e de compartimentos celulares, ativação de mecanismos de defesa não oxidativos (como as poliaminas), etc. Essas rotas podem minimizar os danos e poupam energia que seria direcionada para o complexo antioxidante (BITTSÁNSZKY et al., 2015; CIPRIANO et al., 2021). Mesmo que o sintoma comum de toxidez não possa ser evitado, tais mecanismos reduzem o tempo de exposição a concentrações altas de NH_4^+ (BOSCHIERO et al., 2019; SHILPHA; SONG; JEONG, 2023; YANG et al., 2019).

A folhas com maior intensidade de dano foliar apresentaram não somente alto teor de AS, também TU se manteve alto nas folhas que receberam dose 29 % de ureia (**Figura 9**). A capacidade da célula de armazenar a ureia em vacúolo bem como minimiza a possibilidade de dano, diferente do que acontece com amônio (BITTSÁNSZKY et al., 2015; WANG et al., 2008). No presente estudo, os teores foram maiores do que os reportados por Gerendás e Sattelmacher (1997; 1999), e semelhantes aos encontrados na soja (ONO et al., 2021), que tem maior atividade do ciclo da ureia. Dessa forma, tanto TU quanto AS apresentaram valores médios altos na folha, e potencial nível de dano ao tecido. Enquanto o AS foi reduzido aos 7 dias APF para formação de AA, o TU aumentou em comparação a 3 dias APF. Segundo esses resultados, tanto ureia quanto amônio estiveram associados aos danos foliares iniciais. Como o estudo foi encerrado aos 7 dias APF, o efeito da manutenção de TU alto não foram avaliados.

3.4.3. *Nutrição e produção de biomassa da cana-de-açúcar*

Uma vez absorvido, o N da ureia pulverizada sobre as folhas é assimilado em aminoácidos, utilizados para síntese de moléculas compostas por N. Os aminoácidos são a base para promover crescimento e produção de biomassa. N e Ni atuam no estímulo do metabolismo de nitrogênio, promovendo respostas positivas sobre a produção das culturas (ZHANG et al., 2022).

A adubação foliar com ureia aumentou a disponibilidade de N para as plantas, expresso pelo aumento do teor de N total na planta inteira, principalmente com doses mais altas. (**Figura 15**). A combinação 7 % de ureia + 1,70 mM de Ni se apresentou melhor desempenho na nutrição, uma vez que atingiu o mesmo teor de N total com menor concentração de ureia, quando comparado aos tratamentos 14 % ou 29 % de ureia + Ni. A combinação de ureia + 3,41 mM de Ni não diferiu do controle, o pode ter ocorrido em função do estímulo à volatilização

de NH_3 (SCHLOSSBERG; MCGRAW; SEBRING, 2018; WESELY et al., 1987), concordando com o resultado do teor de amônio no mesmo período de coleta (7 dias APF) (**Figura 10**).

Apesar da correlação que existe entre disponibilidade de N e produção de biomassa em ambientes com baixa disponibilidade de N (BOSCHIERO et al., 2020), como foi simulado no presente estudo, o tempo entre a pulverização foliar e a avaliação do crescimento (7 dias) limitou o efeito de crescimento aos entrenós mais novos (**Tabela 7**, **Figura 14**). No estudo de Leite et al. (2020), plantas de cana-de-açúcar cultivadas em vaso não apresentaram alteração no crescimento nos primeiros 15 dias APF com ureia.

Na avaliação de regressão, os modelos linear e quadrático se ajustaram aos dados de crescimento da cana-de-açúcar (APÊNDICE D). Nesse contexto, as doses com melhor desempenho foram 2,3 mM de Ni e 19 % de ureia. Essa dose de ureia corresponde a 13 kg de N via foliar que tem sido a dose limite trabalhada em campo (cerca de 8% de N), sem risco de queima foliar (ANDRADE et al., 2024; CASTRO et al., 2023).

O IFCa, que infere sobre o teor de N na folha devido a relação com a coloração verde (CERQUEIRA et al., 2019), mostrou pouca variação em função dos tratamentos. Apenas aos 7 dias APF, a combinação ureia + 1,70 mM de Ni apresentou redução do IFCa, o que pode ser devido à evolução da necrose do tecido dentro desse período. Esse índice foi reduzido por dose elevada de Ni em mudas de milho, o que foi associado com redução do teor de N na parte aérea (UĞURLAR, 2024). Aos 7 dias APF as folhas apresentavam clorose e necrose intensas na porção marginal e apical, mas as leituras do IFCa ocorreram na região do terço médio folha, onde a maior parte da folha estava verde (APÊNDICE B). Os valores médios de IFCa obtidos no presente estudo estiveram próximos de 30, o que está associado a teores adequados de N na folha da cana-de-açúcar, entre 15 e 20 g kg^{-1} de N (CERQUEIRA et al., 2019; SILVA et al., 2020)

A aplicação conjunta de ureia e Ni aumentou o teor de Ni na planta, e a dose 7 % de ureia foi suficiente para aumentar a absorção de Ni. Isso ocorre devido à forma de transporte e absorção da ureia. A ureia atravessa a cutícula com mais rapidez utilizando canais aquosos, sendo acompanhada por outros íons. Na membrana plasmática, os transportadores de ureia são de baixa afinidade e permitem o deslocamento combinado de outros íons, que entram na célula mais rapidamente do que quando a ureia não está presente (WITTE, 2011; LI; LIU, 2015).

A efetividade do manejo foliar de Ni é comparável aos manejos de solo e solo+foliar, tanto para variáveis nutricionais, bioquímicas, morfológicas ou produtivas (RODAK et al., 2024). Isso se deve à capacidade de translocação do Ni para partes mais novas da planta. Oliveira, Lavres e van der Ent (2021) realizaram pulverização foliar de Ni em folhas com

sintoma de deficiência desse nutriente, e as folhas emitidas depois da pulverização não apresentaram deficiência. Nessas plantas, os autores também observaram por meio de fluorescência de raio X que o Ni esteve concentrado nas nervuras das folhas, antes e depois da pulverização em folhas deficientes, e nas folhas novas sadias.

O teor de Ni das plantas não pulverizadas (12 mg kg^{-1} de Ni na parte aérea) foi suficiente para a AU, mas a adição de 0,85 mM de Ni foi benéfica para a atividade fotossintética de folhas novas (**Figura 12**), indicando que há potencial de resposta para o manejo do Ni na cana-de-açúcar, como sugerido por Bezerra (2018).

3.5. Conclusões

A adição de Ni à solução de pulverização foliar com ureia não estimulou a atividade da urease e não reduziu a queima foliar quando foi utilizada dose alta de ureia. A ureia de forma isolada aumentou a atividade da enzima, cujo nível máximo (10 µmol NH_4^+ g^{-1} h^{-1}) foi atingido com a dose 7 % de ureia, aos 3 dias APF. A atividade máxima foi mantida até 7 dias APF com as doses maiores de ureia, uma vez que a ureia continuava sendo absorvida nesse tempo, mantendo a liberação de amônio e formação de aminoácidos.

O teor de amônio e ureia foram altos em plantas com alta dose de ureia (29 % de ureia), mas somente o teor de ureia se manteve alto aos 7 dias APF, enquanto o teor de amônio solúvel reduziu cerca de 60 %. A combinação de ureia+Ni promoveu redução de amônio quando a dose de ureia foi alta.

O nível de estresse pelo teor de amônio acima do ótimo foi leve, não afetando o aparato fotossintético da folha nem os níveis de MDA. Já o Ni em dose alta promoveu dano ao aparato fotossintético aos 3 dias APF de forma reversível. Aos 7 dias APF, a fluorescência da clorofila retomou o comportamento padrão.

Em 7 dias, o Ni pulverizado na cana-de-açúcar foi remobilizado para folha mais nova não pulverizada, com efeito positivo sobre a eficiência do aparato fotossintético.

O manejo foliar com dose baixa de ureia (7 % de ureia) e Ni (058 mM de Ni) tiveram melhor desempenho sobre o metabolismo da planta, sem comprometer a área fotossintetizante por não causar danos cloróticos ou necróticos, ou danificar o aparato fotossintético. Esse manejo pode ser utilizado para estimular o metabolismo de N da cana-de-açúcar, sendo necessário avaliar seu efeito sobre o crescimento e produtividade da cultura, dando mais tempo entre a pulverização e a avaliação do crescimento.

Referências bibliográficas

ALIBAKHSHI, M; KHOSHGOFTARMANESH A. H. Effects of nickel nutrition in the mineral form and complexed with histidine in the nitrogen metabolism of onion bulb. **Plant Growth Regulation**, v. 75, p. 733–740, 2015. https://doi.org/10.1007/s10725-014-9975-z

ANDRADE, J. J.; OLIVEIRA, E. C. A.; LIMA, A. M. S.; AMORIM, G. P. S.; OLIVEIRA, E. S.; FREIRE, F. J.; ADELINO, W. S. M.; OLIVEIRA FILHO, E. C. Foliar fertilization improves the nitrogen nutrition of sugarcane. **Agriculture**, v. 14, n. 11, p. 1-12, 2024. https://doi.org/10.3390/agriculture14111984

ARNON, D. I.; HOAGLAND, D. R. 1950. **The water culture method for growing plants without soils**. Berkeley: California Agricultural Experimental Station, 347p.

BAKER, N. R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis *in vivo*. **Annual Review of Plant Biology**, v. 59, n. 1, p. 89-113, 2008.

BARCELOS, J. P. Q.; OSORIO, C. R. W. S.; LEAL, A. J. F.; ALVES, C. Z.; SANTOS, E. F.; REIS, H. P. G.; REIS, A. R. Effects of foliar nickel (Ni) application on mineral nutrition status, urease activity and physiological quality of soybean seeds. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 2, p. 184-192, 2017. http://doi.org/10.21475/ajcs.17.11.02.p240

BARCELOS, J. P. Q.; REIS, H. P. G.; GODOY, C. V.; GRATÃO, P. L.; FURLANI JUNIOR, E.; PUTTI, F. F.; CAMPOS, M.; REIS, A. R. Impact of foliar nickel application on urease activity, antioxidant metabolism and control of powdery mildew (*Microsphaera diffusa*) in soybean plants. **Plant Pathology**, v. 67, n. 7, p. 1502-1513, 2018. http://doi.org/10.1111/ppa.12871

BASHIR, I.; WAR, A. F.; RAFIQ, I.; RESHI, Z. A.; RASHID, I.; SHOUCHE, Y. S. Phyllosphere microbiome: diversity and functions. **Microbiological Research**, v. 254, p. 126888, 2022. https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126888

BEZERRA-NETO, E.; BARRETO, L. P. Determinação de aminoácidos livres totais. In: **Análises químicas e bioquímicas em plantas**. Editora Universitária da UFRPE. Recife, PE: 2011.

BITTSÁNSZKY, A.; PILINSZKY, K.; GYULAI, G.; KOMIVES, T. Overcoming ammonium toxicity. **Plant Science**, v. 231, p. 184-190, 2015. http://dx.doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.12.005

BOSCHIERO, B. N.; MARIANO, E.; AZEVEDO, R. A.; TRIVELIN, P. C. O. Influence of nitrate-ammonium ratio on the growth, nutrition, and metabolism of sugarcane. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 139, p. 246-255, 2019. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.03.024

BOSCHIERO, B. N.; MARIANO, E.; TORRES-DORANTE, L. O.; SATTOLO, T. M.; OTTO, R.; GARCIA, P. L.; DIAS, C. T. S.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen fertilizer effects on sugarcane growth, nutritional status, and productivity in tropical acid soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 117, p. 367-382, 2020. https://doi.org/10.1007/s10705-020-10074-w

BRUNO, I. P.; MORAES, M. F.; DAMIN, V.; DOURADO-NETO, D.; REICHARDTM K. Does nickel influence leaf nitrogen uptake in coffee seedlings?. **Brazilian Journal of Agriculture**, v. 94, n. 3, p. 259-269, 2019. https://doi.org/10.37856/bja.v94i3.3609

CAMBUÍ, C. A.; GASPAR, M.; MERCIER, H. Detection of urease in the cell wall and membranes from leaf tissues of bromeliad species. **Physiologia Plantarum**, v. 136, n. 1, p. 86-93, 2009. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2009.01217.x

CASTRO, S. A. Q.; KICHEY, T.; PERSSON, D. P.; SCHJOERRING, J. K. Leaf scorching following foliar fertilization of wheat with urea or urea–ammonium nitrate is caused by ammonium toxicity. **Agronomy**, v. 12, n. 6, p. 1405, 2022. https://doi.org/10.3390/agronomy12061405

CASTRO, S. A. Q.; SERMARINI, R. A.; ROSSI, M. L.; CASTRO, R. R. L.; TRIVELIN, P. C. O.; LINHARES, F. S. Optimizing foliar N-fertilization in sugarcane depends on plant genotype and nitrogen concentration. **Physiologia Plantarum**, v. 175, n. 6, p. 14085, 2023b. https://doi.org/10.1111/ppl.14085

CERQUEIRA, G.; SANTOS, M. C.; MARCHIORI, P. E. R.; SILVEIRA, N. M.; MACHADO, E. C.; RIBEIRO, R. V. Leaf nitrogen supply improves sugarcane photosynthesis under low temperature. **Photosynthetica**, Praga, v. 57, n. 1, p. 18-26, 2019. https://doi.org/10.32615/ps.2019.033

CIPRIANO, M. A. P.; FREITAS-IÓRIO, R. P.; DIMITROV, M. R.; ANDRADE, S. A. L.; KURAMAE, E. E.; SILVEIRA, A. P. D. Plant-growth endophytic bacteria improve nutrient use efficiency and modulate foliar N-metabolites in sugarcane seedling. **Microorganisms**, v. 9, n. 3, p. 479, 2021. https://doi.org/10.3390/microorganisms9030479

DEUNER, S.; NASCIMENTO, R.; FERREIRA, L. S.; BADINELLI, P. G.; KERBER, R. S. Adubação foliar e via solo de nitrogênio em plantas de milho em fase inicial de desenvolvimento. **Ciências e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1359-1365, 2008. https://doi.org/10.1590/s1413-70542008000500001

DIAS, M. dos S.; SILVA, F. A.; FERNANDES, P. D.; FARIAS, C. H. A.; LIMA, R. F.; SILVA, M. F. C.; LIMA, V. R. N.; LIMA, A. M.; LACERDA, C. N.; REIS, L. S.; SOUZA, W. B. B.; SILVA, A. A. R.; ARRUDA, T. F. L. Beneficial effect of exogenously applied calcium pyruvate in alleviating water deficit in sugarcane as assessed by chlorophyll a fluorescence technique. **Plants**, v. 13, n. 3, p. 434, 2024. https://doi.org/10.3390/plants13030434

FELKER. P. Microdetermination of nitrogen in seed protein extracts with the salicylate-dichloroisocyanurate color reaction. **Analytical Chemistry**, v. 49, n. 7, p. 1080-1080, 1977.

FERNÁNDEZ, V.; GIL-PELEGRÍN, E.; EICHERT, T. Foliar water and solute absorption: an update. **The Plant Journal**, v. 105, n. 4, p. 870-883, 2021. https://doi.org/10.1111/tpj.15090

GERENDÁS, J.; SATTELMACHER, B. Significance of Ni supply for growth, urease activity and the concentrations of urea, amino acids and mineral nutrients of urea-grown plants. **Plant and Soil**, v. 190, p. 153-162, 1997.

GERENDAS, J.; SATTELMACHER, B. Influence of Ni supply on growth and nitrogen metabolism of *Brassica napus* L. grown with NH_4NO_3 or urea as N source. **Annals of Botany**, v. 83, n. 1, p. 65-71, 1999.

HACHIYA, T.; INABA, J.; WAKAZAKI, M.; SATO, M.; TOYOOKA, K.; MIYAGI, A; KAWAI-YAMADA, M.; SUGIURA, D.; NAKAGAWA, T.; KIBA, T.; GOJON, A.; SAKAKIBARA, H. Excessive ammonium assimilation by plastidic glutamine synthetase causes ammonium toxicity in *Arabidopsis thaliana*. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 4944, 2021. https://doi.org/10.1038/s41467-021-25238-7

HASSAN, M. U.; CHATTHA, M. U.; KHAN, I.; CHATTHA, M. B.; AAMER, M.; NAWAZ, M.; ALI, A.; KHAN, M. A. U.; KHAN, T. A. Nickel toxicity in plants: reasons, toxic effects, tolerance mechanisms, and remediation possibilities – a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, p. 12673-12688, 2019. https://doi.org/10.1007/s11356-019-04892-x

HEATH, R. L.; PACKER, L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, v. 125, p. 189–198, 1968.

HOGAN, M. E.; SWIFT, I. E.; DONE, J. Urease assay and ammonia release from leaf tissues. **Phytochemistry**, v. 22, p. 663–667, 1983. https://doi.org/10.1016/s00319422(00)86958-7

HOULT, E. H.; MCGARITY, J. W. Urease activity on the phylloplane-measurement and activity levels following urea application. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 20, n. 13-14, p. 1335-1351, 1989. https://doi.org/10.1080/00103628909368154

JIAN, S.; LIAO, Q.; SONG, H.; LIU, Q.; LEPO, J. E.; GUAN, C.; ZHANG, J.; ISMAIL, A. M.; ZHANG, Z. NRT1.1-related NH_4^+ toxicity is associated with a disturbed balance between NH_4^+ uptake and assimilation. **Plant Physiology**, v. 178, n. 4, p. 1473-1488, 2018. https://doi.org/10.1104/pp.18.00410

KOJIMA, S.; BOHNER, A.; GASSERT, B.; YUAN, L.; VON WIRÉN, N. AtDUR3 represents the major transporter for high-affinity urea transport across the plasma membrane of nitrogen-deficient Arabidopsis roots. **The Plant Journal**, v. 52, p. 30–40, 2007. https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2007.03223.x

KUTMAN, B. Y.; KUTMAN, U. B.; CAKMAK, I. Nickel-enriched seed and externally supplied nickel improve growth and alleviate foliar urea damage in soybean. **Plant Soil**, v. 363, p. 61-75, 2013. http://doi.org/10.1007/s11104-012-1284-6

LEITE, J. M.; ARACHCHIGE, P. S. P.; CIAMPITTI, I. A.; HETTIARACHCHI, G. M.; MAURMANN, L.; TRIVELIN, P. C. O.; PRASAD, P. V. V.; SUNOJ, S. V. J. Co-addition of humic substances and humic acids with urea enhances foliar nitrogen use efficiency in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). **Heliyon**, v. 6, n. 10, e05100, 2020. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05100

LI, M.; LIU, Z. Effects of reducing application amount of base fertilizer and increasing application time of leaf fertilizer on corn yield. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v. 16, n. 5, p. 947-950, 2015.

McCULLOUGH, H. The determination of ammonia in whole blood by a direct colorimetric method. **Clinica Chimica Acta**, v. 17, p. 297–304, 1967. https://doi.org/10.1016/0009-8981(67)90133-7

MORAES, M. F.; REIS, A. R.; MORAES, L. A. C.; LABRES-JUNIOR, J.; VIVIAN, R.; CABRAL, C. P.; MALAVOLTA, E. Effects of molybdenum, nickel, and nitrogen sources on the mineral nutrition and growth of rice plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 40, n. 21-22, p. 3238-3251, 2009. https://doi.org/10.1080/00103620903267590

OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, R. I.; FREIRE, M. B. G. S.; SIMÕES NETO, D. E.; SILVA, S. A. M. Extração e exportação ode nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1343-1352, 2010. https://doi.org/10.1590/s0100-06832010000400031

OLIVEIRA, J. B.; LAVRES, J.; VAN DER ENT, A. In situ analysis of nickel uptake from foliar application in pecan using instrumental µXRF analysis. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, p. 1-9, 2021. https://doi.org/10.1007/s42729-021-00599-6

ONO, Y.; FUKASAWA, M.; SUEYOSHI, K.; OHTAKE, N.; SATO, T.; TANABATA, S.; TOYOTA, R.; HIGUCHI, K.; SAITO, A.; OHYAMA, T. Application of nitrate, ammonium, or urea changes the concentrations of ureides, urea, amino acids and other metabolites in xylem sap and in the organs of soybean plants (*Glycine max* (L.) Merr.). **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 9, p. 4573, 2021. https://doi.org/10.3390/ijms22094573

RAJPUT, V. D.; HARISH; SINGH, R. K.; VERMA, K. K.; SHARMA, L.; QUIROZ-FIGUEROA, F. R.; MEENA, M.; GOUR, V. S.; MINKINA, T.; SUSHKOVA, S.; MANDZHIEVA, S. Recent developments in enzymatic antioxidant defence mechanism in plants with special reference to abiotic stress. **Biology**, v. 10, n. 4, p. 267, 2021. https://doi.org/10.3390/biology10040267

RAMPAZZO, M. V.; CUNHA, M. L. O.; OLIVEIRA, L. C. A.; SILVA, V. M.; LANZA, M. G. D. B.; MELO, A. A. R.; REIS, A. R. Physiological roles of nickel on antioxidant and nitrogen metabolism increasing the yield of sugarcane plants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 4, p. 4438–4448, 2022. https://doi.org/10.1007/s42729-022-01045-x

RIDESA – REDE INTERUNIVERSITÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROENERGÉTICO. Censo varietal. Censo varietal nacional. Principais variedades. Safra: 2023/2024. < https://www.ridesa.com.br/censo-varietal>. Acesso em Abril/2025.

RODAK, B. W.; FREITAS, D. S.; ROSSI, M. L.; LINHARES, F. S.; MORO, E.; CAMPOS, C. N. S.; REIS, A. R.; GUILHERME, L. R.; LAVRES, J. A study on nickel application methods for optimizing soybean growth. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 10556, 2024. https://doi.org/10.1038/s41598-024-58149-w

SANTOS, R. L.; FREIRE, F. J.; OLIVIERA, E. C. A.; FREIRE, M. B. G. S.; WEST, J. B.; BARBOSA, J. A.; MOURA, M. J. A.; BEZERRA, P. C. Nitrate reductase activity and nitrogen and biomass accumulation in sugarcane under molybdenum and nitrogen fertilization. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, p. 1-19, 2019. https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20180171

SCHLOSSBERG, M. J.; MCGRAW, B. A.; SEBRING, R. L. Ammonia volatilization from putting greens foliarly fertilized by conventional or stabilized urea. **Agricultural & Environmental Letters**, v. 3, n. 1, p. 180019, 2018. https://doi.org/10.2134/ael2018.04.0019

SHAHZAD, B.; TANVEER, M.; REHMAN, A.; CHEEMA, S. A.; FAHAD, S.; REHMAN, S.; SHARMA, A. Nickel; whether toxic or essential for plants and environment - A review. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 132, p. 641-651, 2018. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.10.014

SHILPHA, J.; SONG, J.; JEONG, B. R. Ammonium phytotoxicity and tolerance: An insight into ammonium nutrition to improve crop productivity. **Agronomy**, v. 13, n. 6, p. 1487, 2023. 7. https://doi.org/10.3390/agronomy13061487

SILVA, A. M. de S.; OLIVEIRA, E. C. A.; ANDRADE, J. J.; LIMA, A. M. S.; ALMEIDA, B. G. A.; TRIVELIN, P. C. O.; FREIRE, F. J.; GUIMARÃES, D. H. The leaching potential and recovery of ^{15}N-fertilizer by sugarcane cultivated in sandy soil. **SugarTech**, v. 26, n. 5, p. 1-15, 2024. https://doi.org/10.1007/s12355-024-01479-w

SILVA, F. C. S. **Manual de análises químicas de solo, plantas e fertilizantes.** ed. téc. Fábio Cesar da Silva. 2ª ed. revista e ampliada – Embrapa Informação Tecnológica. 627 p. Brasília, DF: 2009.

SILVA, 2020. **Adubação molíbdica e Bactérias promotoras de crescimento na nutrição nitrogenada da cana-de-açúcar.** 232f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Departamento de Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2020.

TEIXEIRA, 2017. **Manual de métodos de análise de solo**. eds. téc. Paulo Cesar Teixeira [et al.], 3. ed. rev. e ampl. – Embrapa Informação Tecnológica. 573 p. Brasília, DF.

TEIXEIRA, G. C. M.; PRADO, R. M.; ROCHA, A. M. S.; SOUSA JUNIOR, G. S.; GRATÃO, P. L. Beneficial effect of silicon applied through fertigation attenuates damage caused by water deficit in sugarcane. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 41, p. 3255–3270, 2022. https://doi.org/10.1007/s00344-021-10510-3

TRIVELIN, P. C. O.; CARVALHO, J. G.; SILVA, A. D.; PRIMAVESI, A. D. A.; CAMACHO, E.; EIMORE, I.; GUILHERME, M. R. Adubação foliar de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.): Absorção e translocação de ureia – ^{15}N. **Energia Nuclear na Agricultura**, Piracicaba, v. 9, n. 2, p. 52-65, 1988.

UĞURLAR, F. Influence of nickel on urease activity and nitrogen dynamics in maize (*Zea mays*) under saline conditions. **MAS Journal of Applied Sciences**, v. 9, n. 4, p. 984-994, 2024. http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14306271

USCOLA, M.; VILLAR-SALVADOR, P.; OLIET, J.; WARREN, C. R. Foliar absortion and root translocation of nitrogen from different chemical forms in seedlings of two Mediterranean trees. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v. 104, p. 34-43, 2014. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.03.004

VLEK, P. L. G.; STUMPE, J. M. Effects of solution chemistry and environmental conditions on ammonia volatilization losses from aqueous systems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 42, n. 3, p. 416-421, 1978.

WANDERLEY, L. R. S.; OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; SIMÕES NETO, D. E.; SANTOS, R. L. Nutritional requirement by irrigated brazilian sugarcane varieties. **SugarTech**, v. 23, n. 4, p. 762-775, 2021. https://doi.org/10.1007/s12355-020-00921-z

WANG, W.; KÖHLER, B.; CAO, F.; LIU, L. Molecular and physiological aspects of urea transport in higher plants. **Plant Science**, v. 175, p. 467–477, 2008. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2008.05.018

WEATHERBURN, M.W. Phenol-hypochlorite reaction for determination of ammonia. **Analytical Chemistry**, v. 39, n. 8, p. 971-974, 1967.

WESELY, R. W.; SHEARMAN, R. C.; KINBACHER, E. J.; LOWRY, S. R. Ammonia volatilization from foliar-applied urea on field-grown Kentucky bluegrass. **HortScience**, v. 22, n. 6, p. 1278-1280, 1987.

WITTE, C. P. Urea metabolism in plants. **Plant Science**, Limerick, v. 180, n. 3, p. 431-438, 2011. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.11.010

YANG, Y.; GAO, S.; JIANG, Y.; LIN, Z.; LUO, J.; LI, M.; GUO, J.; SU, Y.; XU, L; QUE, Y. The physiological and agronomic responses to nitrogen dosage in different sugarcane varieties. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 406, 2019. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00406

YUSUF, M.; FARIDUDDIN, Q.; HAYAT, S.; AHMAD, A. Nickel: an overview of uptake, essentiality and toxicity in plants. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 86, p. 1-17, 2011. https://doi.org/10.1007/s00128-010-0171-1

ZENG, Q.; LING, Q.; WU, J.; YANG, Z.; LIU, R.; QI, Y. Excess copper-induced changes in antioxidative enzyme activity, mineral nutrient uptake and translocation in sugarcane seedlings. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 103, p. 834–840, 2019. https://doi.org/10.1007/s00128-019-02735-6

ZHANG, K.; LI, S.; XU, Y.; ZHOU, Y.; RAN, S.; ZHAO, H.; HUANG, W. XU, R.; ZHONG, F. Effect of nickel ions on the physiological and transcriptional responses to carbon and nitrogen metabolism in tomato roots under low nitrogen levels. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 19, p. 11398, 2022. https://doi.org/10.3390/ ijms231911398

4. CAPÍTULO III - REDUÇÃO DA ADUBAÇÃO NITROGENADA COM USO DA PULVERIZAÇÃO FOLIAR DE UREIA E NÍQUEL EM CANA-DE-AÇÚCAR

Resumo

O fornecimento de nitrogênio (N) via solo é uma prática de baixa eficiência, e a adubação foliar complementa a nutrição em fases de maior demanda pelo nutriente, com alto aproveitamento do fertilizante pela planta. A pulverização foliar com ureia combinada com níquel (Ni) pode estimular o metabolismo de N e aumentar o aproveitamento do N-fertilizante no ciclo da cultura. O objetivo do estudo foi avaliar a associação de ureia e Ni na pulverização foliar para estímulo do metabolismo de N, crescimento e produtividade da cana-de-açúcar manejada com redução da dose de N via solo. O estudo foi conduzido em campo, com delineamento de blocos ao acaso e distribuição dos tratamentos em fatorial, com 3 doses de ureia e 3 doses de Ni na pulverização foliar. A variedade utilizada foi a RB92579, no terceiro ciclo de cultivo. A redução da dose de solo foi 25 % da recomendação de N. A pulverização foliar ocorreu aos 180 dias após o corte. As coletas foram realizadas aos 2, 18 e 50 dias após a pulverização foliar (APF). As variáveis avaliadas foram atividade da urease (AU), teor de ureia (TU), teor de amônio solúvel (AS), teor de aminoácidos (AA), peroxidação lipídica (MDA), índices de clorofila, teor de N e Ni na folha +1, acúmulo de N e Ni, biometria, produtividade de colmos (TCH), produtividade de açúcar (TPH), e variáveis de qualidade industrial. Não houve manchas cloróticas nas folhas apesar da alta concentração de amônio nas folhas que receberam 14 % de ureia. A pulverização foliar aumentou os teores de N e Ni na folha +1, AS e AA. Dose alta de Ni comprometeu a eficiência fotossintética, mas não houve efeito dos tratamentos no teor de MDA. Houve remobilização do N da ureia e de Ni para as folhas emitidas após a pulverização. Não houve efeito dos tratamentos sobre TCH, mas o TPH foi maior com a combinação de ureia + Ni. O Ni estimulou o metabolismo de N, mas o manejo ureia + N não promoveu o crescimento das plantas em relação às plantas não pulverizadas. O manejo 7 % de ureia + 25 g ha^{-1} de Ni apresentou o melhor desempenho. O manejo precisa ser validado em mais ciclos da cultura, e antecipado para o início do crescimento de colmos para aumentar o potencial produtivo e viabilizar a redução da adubação via solo.

Palavras-chave: Metabolismo de ureia. Remobilização de nutrientes. Nutrição da cana-de-açúcar.

REDUCTION OF NITROGEN FERTILIZATION SOIL DUE TO SPRAYING UREA AND NICKEL ON SUGARCANE LEAVES

Abstract

Soil-applied nitrogen (N) fertilization has low efficiency, while foliar fertilization complements plant nutrition during periods of high nutrient demand, ensuring greater fertilizer uptake. Foliar spraying with urea and nickel (Ni) can stimulate N metabolism and enhance N-fertilizer utilization throughout the crop cycle. This study aimed to evaluate the association of urea and Ni in foliar spraying to stimulate N metabolism, growth, and yield of sugarcane under reduced soil N fertilization. The field experiment was carried out in a randomized block design with factorial treatment distribution, consisting of three urea doses and three Ni doses in foliar spraying. The sugarcane variety RB92579 was used in third ratoon cycle. Soil N was reduced to 75% of the recommended rate. Foliar spraying was performed 180 days after harvest, with sampling at 2, 18, and 50 days after foliar spraying (AFS). The evaluated variables included urease activity (UA), urea content (UC), soluble ammonium (SA), amino acid content (AA), lipid peroxidation (MDA), chlorophyll indices, N and Ni content in leaf +1, N and Ni accumulation, biometric parameters, stalk yield (TCH), sugar yield (TPH), and industrial quality traits. No leaf scorching were observed, despite the high ammonium content in leaves treated with 14% urea. Foliar spraying increased N and Ni levels in leaf +1, SA, and AA. A high Ni dose reduced photosynthetic efficiency, but no treatment effects were observed on MDA content. N-urea and Ni were remobilized to newly emerged leaves after spraying. There was no effect on TCH, but TPH increased with the urea + Ni combination. Ni stimulated N metabolism, but the urea + Ni treatment did not enhance plant growth compared to non-sprayed plants. The best performance was observed with 7% urea + 25 g ha^{-1} Ni. The management strategy needs to be validated in additional crop cycles and anticipated to the early stalk growth phase to enhance yield potential and enable the reduction of soil fertilization.

Keywords: Urea metabolism. Nutriet remobilization. Sugarcane nutrition

4.1. Introdução

O nitrogênio (N) é o segundo elemento mineral mais exigido pela cana-de-açúcar, limitando a produtividade em ambientes com baixa disponibilidade do nutriente no solo. O fornecimento de N-fertilizante via solo é uma prática de baixa eficiência. O manejo de doses e de fontes não são formas sustentáveis de aumentar a produção, uma vez que os ganhos são obtidos pelo aumento da quantidade de N fornecida no ciclo (SILVA et al., 2024).

Uma estratégia de aumento da eficiência da adubação nitrogenada é por meio da pulverização foliar, via que tem recuperação de cerca de 70 % do fertilizante, e que viabiliza o fornecimento do nitrogênio em diferentes fases de desenvolvimento, bem como permite combinar a aplicação de outros nutrientes (CASTRO et al., 2023; DEUNER et al., 2008; TRIVELIN et al., 1988).

A pulverização foliar com ureia estimula a enzima urease, liberando duas moléculas de amônio que serão utilizadas no metabolismo de N. Essa reação é ativada pelo níquel (Ni), que também está envolvido no sistema de defesa da planta, mas ainda pouco estudado na nutrição da cana-de-açúcar (RAMPAZZO et al., 2022). Na cana-de-açúcar, parte da dose de N pode ser deslocada do solo para folha para aumento da eficiência do uso do fertilizante sem comprometimento da produção (ANDRADE et al., 2024), no entanto, a dose utilizada deve ser estudada para garantir a disponibilidade do N sem risco de danos foliares (CASTRO et al., 2022).

O manejo combinado de N e Ni pode estimular a metabolização da ureia na folha, reduzir os danos pelo acúmulo de ureia no tecido (KUTMAN; KUTMAN; CAKMAK, 2013). O Ni atua na hidrólise da ureia, o que pode possibilitar o aumento da concentração de ureia na calda fornecida via folha pelo estímulo da atividade da urease. O fornecimento do N em fase de maior demanda e alta taxa de conversão do N em biomassa pode também viabilizar a redução da dose de N via folha pelo melhor aproveitamento da ureia no metabolismo da planta. O manejo combinado pode reduzir a dose de solo e aumentar a eficiência do fertilizante nitrogenado fornecido no ciclo de produção (ANDRADE et al., 2024; CASTRO et al., 2023).

Os efeitos positivos da combinação de N com Ni sobre o estímulo do metabolismo de N, bem como crescimento e produtividade de outras culturas já vem sendo estudado (BRUNO et al., 2019; FREITAS et al., 2018; HOSSENI et al., 2013; OLIVEIRA; LAVRES; VAN DER ENT, 2021), mas ainda não foi avaliado para a cana-de-açúcar.

O objetivo desse estudo foi avaliar a adição de Ni na calda de pulverização foliar com ureia no estímulo do metabolismo de N na cana-de-açúcar adubada com dose reduzida de N via solo, em condições de campo.

4.2. Material e Métodos

4.2.1. *Localização da área experimental e condições de cultivo*

A área experimental está situada na formação geológica de Tabuleiros Costeiros (**Figura 16**), com predomínio de solos arenosos, com baixa CTC e baixos teores de N e Ni (**Tabela 9**) (EMBRAPA, 2014). O estudo foi conduzido em condições de campo, em área de plantio comercial de cana-de-açúcar da usina Miriri Alimentos e Bioenergia, localizada no município de Santa Rita, no litoral do Estado da Paraíba. A área experimental estava localizada no minicípio de Rio Tinto (6°56'11"S 35º08'37"W, a 28 km do mar) (**Figura 17**).

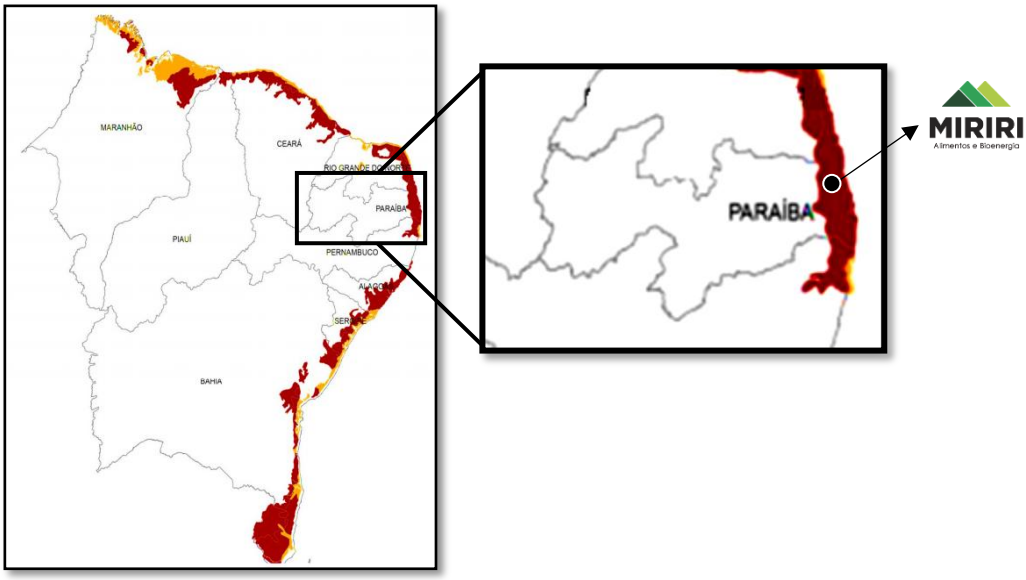
A unidade experimental consistiu em oito sulcos de plantio com cinco metros de comprimento e espaçamento duplo (1,6 m x 0,8 m), perfazendo área total de 48,0 m^2 (**Figura 17**). A área útil considerou quatro sulcos centrais, descartando um metro do início e do final da linha, totalizando 14,4 m^2. Na área útil, dois sulcos foram destinados para amostragem destrutiva e dois sulcos para amostragem não destrutiva. Os sulcos destinados para amostragem não destrutiva foram utilizados para estimativa de produtividade no final do ciclo.

A variedade estudada foi a RB92579, a mais plantada na região Nordeste (RIDESA, 2025), no ciclo de cana soca, na segunda rebrota (terceiro ciclo de cultivo), sob irrigação por pivô central. No ciclo anterior, a área foi colhida para produção de semente, com produtividade 70 Mg ha^{-1}, cujo corte foi realizado entre janeiro e fevereiro de 2022.

4.2.2. *Caracterização da área experimental*

O solo foi coletado nas profundidades 0 a 20 cm e 20 a 40 cm, em cinco pontos aleatórios, para compor uma amostra composta. O solo foi caracterizado, seguindo a metodologia proposta pela Embrapa (TEIXEIRA, 2017). A caracterização física consistiu em avaliação granulométrica pelo método da pipeta para definição do grupamento textural. A caracterização química consistiu na análise de pH em água (1:2,5); acidez potencial extraída em acetato de cálcio 0,5 mol L^{-1}; Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Na^+, Mn, Fe, Cu e Zn em Mehlich 3; Al^{3+} foi extraído em NH_4Cl; O P foi extraído em Mehlich 1; P-remanescente foi determinado usando solução com 100 mg de P e cloreto de Ca como extrator; Ni foi extraído por digestão total em ácido fluorídrico; carbono orgânico total (C.O.T.) por combustão úmida com dicromato de sódio. O P, P-rem e Al^{3+} foram determinados por espectrofotometria; Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Na^+, Mn, Fe, Cu, Zn e Ni por espectroscopia de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES); C.O.T. foi determinado por titulometria. A partir desses resultados foram calculadas a saturação de bases (V%), saturação de Al (m%), e capacidade de troca catiônica (CTC) efetiva e potencial. Os resultados da caracterização química e física estão descritos na **Tabela 9**.

Figura 16 - Formação geológica de Tabuleiros costeiros no litoral do Nordeste (cor vermelha). Destaque para a localização do campo experimental no Estado da Paraíba.



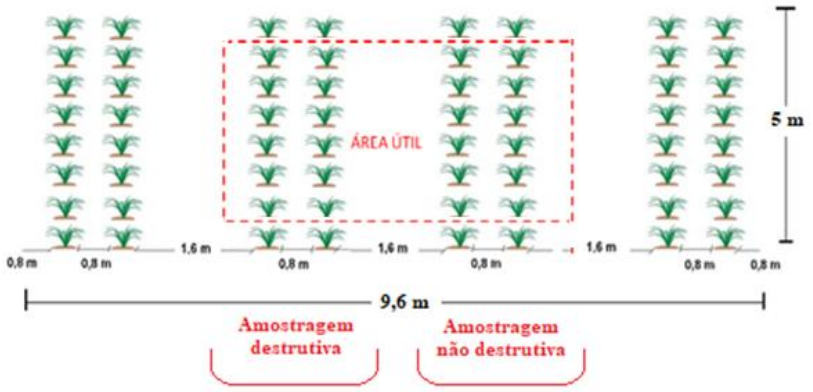
Fonte: Adaptado de Embrapa (2014).

Tabela 9 - Caracterização do solo da área do campo experimental

Atributos	0 – 20 cm	20-40 cm
$pH_{H2O(1:2,5)}$	6,3	5,29
	g dm^{-1}	
C.O.T.	8,43	4,46
	$cmol_c dm^{-3}$	
Ca^{2+}	4,05	1,03
Mg^{2+}	2,02	0,54
K^{+}	0,13	0,07
Na^{+}	0,06	0,03
Al^{3+}	0,00	0,00
H+Al	1,97	3,63
SB	6,26	1,67
$CTC_{efetiva}$	6,26	1,67
$CTC_{potencial}$	8,23	5,30
	%	
V	76,06	31,51
m	0,00	0,00
	mg L^{-1}	
P-rem	43,70	31,15
	mg dm^{-3}	
P	6,67	4,51
Fe	224,03	261,99
Cu	0,06	0,06
Mn	3,78	1,37
Zn	0,05	0,17
Ni*	<L.D.	<L.D.
Grupamento textural	Arenoso	

*teor total; P-rem: fósforo remanescente. <L.D.: abaixo do limite de detecção.

Figura 17 - Localização da área experimental e descrição das unidades experimentais. Destaque para a área útil, subdividida para amostragem destrutiva e não destrutiva



Fonte: Acervo pessoal.

4.2.3. *Condução experimental*

A adubação de solo para o ciclo experimental foi realizada de forma manual, na linha, em março/2022, aos 60 dias após o corte (DAC). Os macronutrientes foram fornecidos por meio de fertilizantes sólidos: ureia (45 % de N), superfosfato simples (18% de P_2O_5, 16 % de Ca e 18 % de S) e cloreto de potássio (60 % de K_2O). Os micronutrientes foram fornecidos com fertilizantes líquidos (produtos da linha YaraVita), com auxílio de pulverizador costal: *Mantrac*® (Mn), *Zintrac*® (Zn), *Bortrac*® (B), *Molytrac*® (Mo), e *Macozin*® (Mn, Cu, Zn) (**Figura 18**). As doses foram definidas com base na extração da planta para recomendação de N, P e K, e nos teores do solo, e extração da planta para recomendação de micronutrientes, considerando manutenção da produtividade do ciclo anterior (OLIVEIRA et al., 2013; ROCHA et al., 2019; SIMÕES NETO et al., 2015).

No mesmo dia, após a adubação, a área recebeu lâmina de 32 mm para minimizar as perdas da ureia por volatilização. Na adubação de solo, em cada parcela foram aplicados: 340 g de P e 478 g de K, 691 g de Ca, 778 g de S, 25 g de Mn, 19 g de Zn, 2,0 g de Cu, 4,8 g de B e 0,96 g Mo, 478 g Cl.

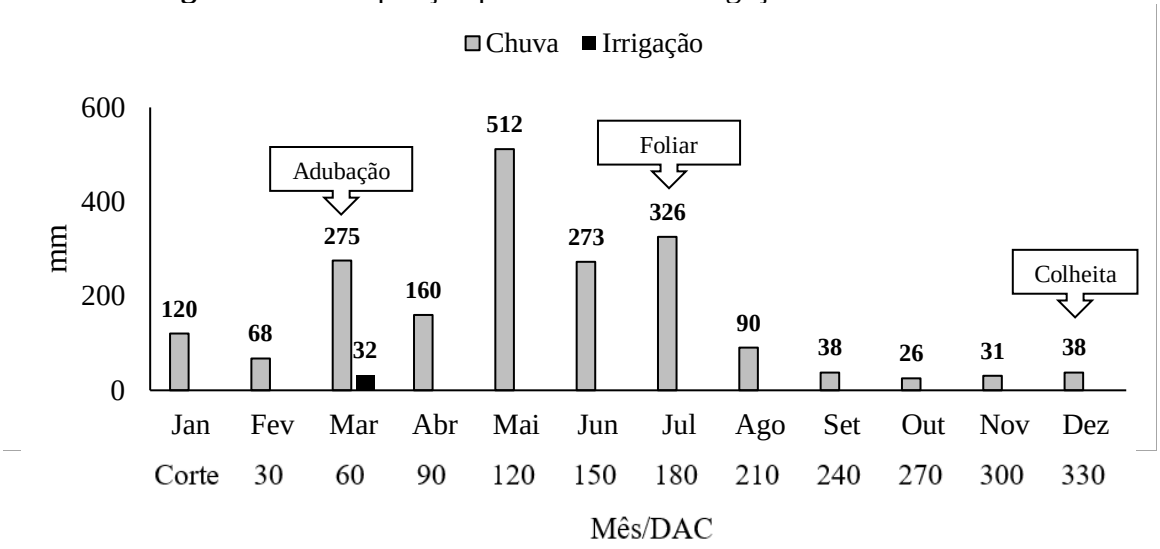
Figura 18 - Preparo de calda e aplicação de micronutrientes via solo

Fonte: Acervo pessoal.

Os tratamentos de solo consistiram em doses de N, sendo aplicada a dose padrão para o ciclo (80 kg ha^{-1}) no tratamento controle adicional (sem aplicação foliar), e dose com redução de 25 % (60 kg ha^{-1}) nos tratamentos com complementação foliar. O percentual de redução da dose teve como base o estudo de Silva et al. (2024), em que a recuperação máxima do N-fertilizante na fase inicial do desenvolvimento da cana-de-açúcar em solo arenoso da região de estudo foi de 18 %.

Do corte até o momento da adubação de solo, a área havia recebido 258 mm de chuva. A partir da adubação até o mês de julho (período chuvoso), a precipitação foi de 1.270 mm, de forma que não foi preciso realizar irrigação (**Figura 19**). O volume de chuvas acumulado desde o corte até o mês de outubro (última coleta de dados) foi de 1.887 mm de chuva.

Figura 19 - Precipitação pluviométrica e irrigação durante o ciclo.



4.2.4. *Pulverização foliar e distribuição dos tratamentos*

A adubação foliar ocorreu em 27 de julho 2022, aos 180 DAC, com o dossel das plantas cobrindo as entrelinhas. Antes de realizar a aplicação foliar, as plantas presentes em 2 metros, selecionados dentro da área útil para amostragem destrutiva, foram delimitadas com fitilho e tiveram as folhas +1 identificadas com cordão (**Figura 20**).

Os tratamentos foliares consistiram em 03 doses de N e 03 doses de Ni (**Tabela 10**), combinados com dose de solo 60 kg ha^{-1}, que corresponde à redução de 25 % menor que a dose recomendada (80 kg ha^{-1}). Os tratamentos foram arranjados em fatorial (3x3), em delineamento de blocos ao acaso, com quatro repetições, totalizando 36 parcelas experimentais.

As fontes fertilizantes utilizadas para adubação foliar foram ureia (46 % de N) e sulfato de Ni hexahidratado ($NiSO_4.6H_2O$, com 22,3 % de Ni). As doses de ureia utilizadas corresponderam a concentrações de 7 % de ureia (3,3 kg ha^{-1} de N) e 14 % de ureia (6,7 kg ha^{-1} de N). E as doses de Ni corresponderam a concentrações de 25 g ha^{-1} de Ni (2,84 mM de Ni) e 50 g ha^{-1} de Ni (5,68 mM de Ni).

O volume de água utilizado por tratamento foi determinado após teste de vazão em quatro parcelas. A quantidade de cada fonte (g L^{-1}) foi calculada para manter a concentração do nutriente de cada dose, considerando volume de calda de 150 L ha^{-1}. Após a aplicação de cada

tratamento, o volume restante na bomba costal foi quantificado para calcular a dose efetivamente aplicada.

Figura 20 – Marcação da folha +1 na área útil de cada parcela

Fonte: Acervo pessoal.

Tabela 10 – Descrição dos tratamentos do experimento conduzido em campo

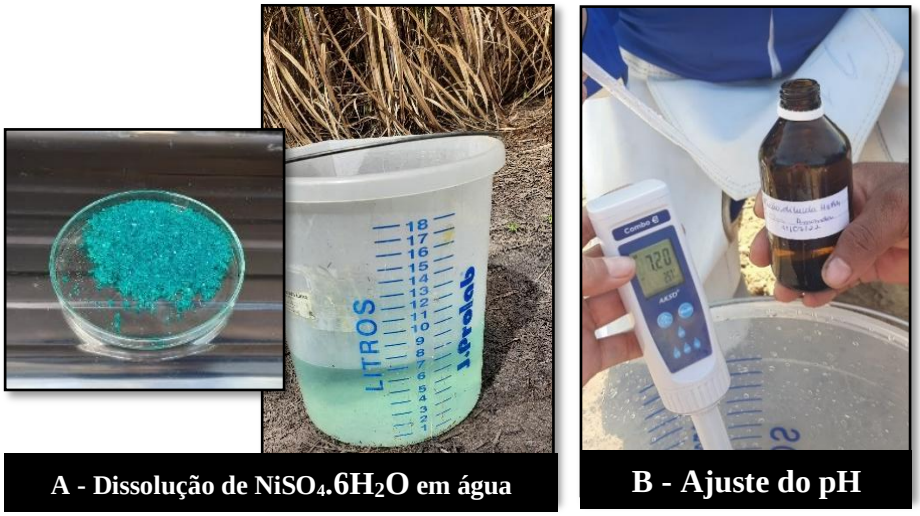
Tratamentos	Solo (kg ha^{-1} N)	Foliar	
		Ureia (%)	Ni (g ha^{-1})
T1	60	0	0
T2			25
T3			50
T4		7,0	0
T5			25
T6			50
T7		14,0	0
T8			25
T9			50

Doses de N: 0, 3,3 e 6,7 kg ha^{-1}.

A água utilizada para o preparo das caldas de aplicação foliar foi de boa qualidade, (previamente tratada), com pH de 7,2 e condutividade elétrica (C.E.) de 17,9 µS cm^{-1}. Em todas as caldas de aplicação foliar foi adicionado adjuvante surfactante (*Disperse Ultra*©, polidimetilsiloxano, dose comercial 0,2 mL L^{-1}). As caldas foram monitoradas quanto à C.E. e pH final, medidos após adição de todos os produtos (**Figura 21**), e então o pH foi ajustado com solução diluída de ácido fosfórico (Química Moderna, 2,95 M). Os materiais utilizados no preparo e aplicação da calda foram lavados de um tratamento para outro, a fim de evitar contaminação.

A ordem de preparo das caldas de aplicação, o monitoramento da C. E. e pH final, bem como a dose efetivamente aplicada de cada nutriente, constam na **Tabela 11**.

Figura 21 – Preparo e monitoramento da calda de pulverização



Fonte: Acervo pessoal.

Tabela 11 – Descrição da composição e propriedades químicas das caldas de cada tratamento

Ordem de preparo	Composição*	pH	C. E. (mS cm^{-1})	Dose efetiva	
				N (kg ha^{-1})	Ni (g ha^{-1})
Calda 1	Água	6,0	18,9	-	-
Calda 2	320 g de ureia	6,0	0,81	4,6	-
Calda 3	600 g de ureia	6,0	1,06	7,7	-
Calda 4	8 g $NiSO_4$	5,9	18,8	-	22
Calda 5	320 g de ureia + 8 g $NiSO_4$	6,3	19,8	4,2	21
Calda 6	600 g de ureia + 8 g $NiSO_4$	6,0	20,2	8,8	23
Calda 7	16 g $NiSO_4$	6,0	19,0	-	43
Calda 8	320 g de ureia + 16 g $NiSO_4$	6,1	19,7	4,2	42
Calda 9	600 g de ureia + 16 g $NiSO_4$	6,0	1,8	9,2	42

*Em todas as caldas foi adicionado adjuvante *Disperse Ultra*©.

A aplicação foliar foi realizada no início da manhã, em condições adequadas: entre 7:00 e 9:00 da manhã, com temperatura média de 26 ºC, umidade 63,5 °C, e velocidade abaixo de 10 km h^{-1} (**Figura 22 - A**). A pulverização da calda foi feita utilizando bomba de pulverização costal manual, adaptada com adição no gatilho de uma haste prolongada com quatro bicos. A qualidade da pulverização foi avaliada com a distribuição de papel hidrossensível (**Figura 22 - D**). O papel foi fixado na superfície das folhas em diferentes parcelas, contemplando plantas

presentes no início, meio e final da linha, além de folhas verdes do ápice e de porções mais baixas da planta. Com isso, observamos e a pulverização promoveu molhamento adequado das folhas, atravessando a copa, atingindo folha +6.

Figura 22 – Registros da pulverização foliar em campo.

Fonte: Acervo pessoal.
A: monitoramento da umidade e velocidade do vento, B: ajustes da barra de pulverização, C: pulverização da calda acima da copa, e D: distribuição das gotas em papel hidrossensível após a pulverização em diferentes estratos da copa.

Após a pulverização houve infestação da cigarrinha-das-folhas e ferrugem alaranjada, pragas comuns no inverno, mas que também ocorram em agosto, em virtude das condições de precipitação maior que o normal no período. Em agosto foi aplicado inseticida tiametoxam (Actara 250 WG®, dose 600 g ha^{-1}). Não houve aplicação de outros insumos agrícolas na área.

4.2.5. *Período de coleta de dados*

As coletas foram realizadas em quatro eventos: aos 2, 18, 50 e 120 dias APF. A quantidade de folhas coletadas por parcela foi três, das 7:00 às 9:00 da manhã, definida conforme sugerido por Santos et al. (2018), em estudo sobre avaliação da atividade enzimática em cana-de-açúcar cultivada em campo.

Nos meses de julho e agosto, as plantas do tratamento controle (sem pulverização foliar) foram monitoradas quanto a quantidade de folhas do ponteiro e renovação da folha +1, para estimar quando a parte mais jovem do dossel (ponteiro e folhas +1, +2 e +3) seria composta por folhas que não tiveram contato com a pulverização foliar.

Coleta 1 – 2 dias após pulverização foliar (APF).

Nas primeiras 48 horas APF espera-se que a maior parte da ureia aplicada tenha sido absorvida (TRIVELIN et al., 1988). As folhas +1 tratadas (identificadas com cordão) foram avaliadas quanto aos índices de clorofila e posteriormente coletadas para avaliação bioquímica, nutricional.

Coleta 2 - 18 dias APF

Aos 180 DAC, foi avaliada a persistência do estímulo ao metabolismo promovido pelos tratamentos. As folhas +1 tratadas (identificadas com cordão) foram avaliadas quanto aos índices de clorofila e posteriormente coletadas para avaliação bioquímica, nutricional.

Coleta 3 - 50 dias APF

Aos 240 DAC, as folhas do ápice da planta (do ponteiro até a folha +3) correspondem ao resultado do estímulo foliar. foram avaliadas quanto aos índices de clorofila e posteriormente coletadas para avaliação bioquímica, nutricional. Assim, foi possível verificar o efeito residual dos parâmetros bioquímicos e translocação dos nutrientes para folhas emitidas APF.

As plantas presentes em 1,0 m previamente delimitado ao lado das plantas marcadas foram avaliadas quanto às variáveis biométricas para quantificar o crescimento após a pulverização.

Coleta 4 – 120 dias APF (330 DAC)

Aos 330 DAC (dezembro/2022), foi realizada a colheita do experimento, com pesagem da área útil para amostragem não destrutiva para estimar a produtividade de colmos e de açúcar, e demais parâmetros de qualidade industrial.

As plantas presentes em 1,0 m delimitado ao lado da coleta anterior (50 dias APF) foram avaliadas quanto às variáveis biométricas para quantificar o crescimento até o final do ciclo de cultivo.

4.2.6. *Procedimentos de coleta*

Índices de clorofila

Os índices coletados foram o Índice Falker de clorofila a (IFCa), com clorofilômetro portátil (*Clorofilog*® CFL1030, Falker) (**Figura 23 - A**), e índices de fluorescência da clorofila a, com fluorímetro portátil (*FluorPen*® FP100, Photon Systems Instruments) (**Figura 23 - B**), entre 8 h e 10 h da manhã.

O IFCa foi obtido por meio de leituras em três pontos do terço médio da folha +3, contemplando os dois lados do limbo foliar.

A fluorescência da clorofila a foi obtida em um ponto do terço médio da folha +1. Pinças de aclimatação ao escuro foram instaladas na folha e após 30 minutos as leituras de fluorescência foram realizadas.

Figura 23 – Leitura dos índices de clorofila.

A – Clorofilômetro (Clorofilog®)

B – Fluorímetro (FluorPen®)
Destaque: pinça de aclimatação ao escuro.

Fonte: Acervo pessoal.

Bioquímica e nutricional

As folhas foram coletadas usando luva descartável, e lavadas com água deionizada para remoção dos resíduos da superfície adaxial e abaxial. O excesso de umidade foi removido com papel toalha macio, no sentido ápice-base da folha. Após a lavagem, descartou-se a nervura central e as extremidades da folha (ápice e base). O terço médio dos limbos foi subdividido em duas partes. Uma parte foi envolta em papel alumínio (**Figura 24**) e armazenada em nitrogênio líquido. A outra parte foi acondicionada em saco de papel, em seguida, posta em estufa de circulação forçada de ar, a 65ºC, até obtenção de peso constante.

De uma parcela para outra, a lâmina da tesoura e as luvas foram lavadas com água deionizada.

Figura 24 – Procedimento de coleta de folha +1 para análise bioquímica

Fonte: Acervo pessoal.

Biometria

As plantas presentes em 1,0 m delimitado dentro da área útil foram contabilizadas aos 180 DAC, descontando as falhas da brotação (trechos da linha de plantio sem colmo medindo mais de 50 cm) (STOLF, 1986), para determinação do número médio de colmos industrializáveis por metro (perfilhamento médio).

Aos 50 APF (240 DAC), os colmos presentes em 1 metro ao lado das plantas demarcadas previamente foram removidos e contados. Nesses colmos foram obtidas as medidas: altura (comprimento da base até a inserção da folha +1); diâmetro dos entrenós das folhas +1, +2 e +3, que receberam tratamento (identificados a partir da folha marcada no dia da pulverização).

Os componentes folhas verdes (folhas verdes abaixo da folha +1 e com mais de 50 % do limbo de coloração verde, incluindo ponteiro), folhas secas (folhas aderidas ao colmo com menos de 50% do limbo de coloração verde) e colmos (material restante após a remoção das folhas) (OLIVEIRA et al. 2010), foram pesados para obtenção da biomassa fresca. Ainda em campo, cada componente foi processado separadamente em forrageira, e o material moído foi subamostrado (aproximadamente 500 g) e pesado para obtenção do peso úmido. Em seguida, a subamostra foi posta em estufa de circulação forçada de ar, a 65ºC, até obtenção de peso constante. O material seco foi direcionado para análise do teor de nutrientes.

A razão entre peso seco/peso úmido resulta no percentual de massa seca da subamostra, utilizado para estimar o percentual de biomassa seca do componente no material colhido (kg ha^{-1}). A soma da biomassa seca de cada componente correspondeu à biomassa seca da parte aérea (Mg ha^{-1}), conforme Equação 1.

Equação 1

$$Biomassa\ seca\ (Mg\ ha^{-1}) = Peso\ fresco * \frac{Peso\ seco\ da\ subamostra}{Peso\ úmido\ da\ subamostra} * \frac{8.333{,}33}{1.000}$$

Estimativa de produtividade de colmos

Na colheita (330 DAC), os colmos da área útil para amostragem não destrutiva (AU_{nd}) foram cortados e pesados com auxílio de dinamômetro digital. A estimativa de produtividade foi calculada descontando o percentual de falhas quantificadas em cada parcela (Equação 2).

Equação 2

$$TCH\ (Mg\ ha^{-1}) = \frac{Pesagem\ AU_{nd}(kg)\ \ x\ \ 8.333{,}33\ m\ \ \ x\ \ \ \%\ falhas}{10\ m\ \ x\ 1000}$$

Parâmetros de qualidade industrial

Após o corte, 6 colmos por parcela foram amostrados aleatoriamente, pesados e encaminhados ao laboratório agroindustrial da Miriri Alimentos e Bioenergia, onde foram processados em forrageira e submetidos à prensa hidráulica (240 kg cm^{-2} min^{-1}) para determinação dos atributos de qualidade agroindustrial: percentagem de sacarose no caldo (% Pol) e do colmo (PC), e açúcar teórico recuperável (ATR). A produtividade de Pol (TPH) foi determinada pela Equação 3 (LIMA NETO et al., 2013).

Equação 3

$$TPH\ (Mg\ ha^{-1}) = \frac{PC\ \%\ \ x\ \ TCH}{100}$$

4.2.7. *Determinação em laboratório*

Bioquímica

Em laboratório, as amostras foram maceradas na presença do antioxidante polivinilpirrolidona (PVPP) e nitrogênio líquido. O material macerado foi armazenado em *ultrafreezer* (-80 °C) até o momento das análises bioquímicas. Todas as reações bioquímicas foram realizadas utilizando água ultrapura.

Atividade da urease (EC 3.5.1.5)

A atividade da urease na folha foi determinada pela quantificação de amônio produzido após a amostra ser incubada, à 30 ºC, em solução tampão com ureia. A quantidade de amônio foi determinada pelo método colorimétrico, utilizando curva padrão (HOGAN; SWIFT; DONE, 1983; McCULLOUGH, 1967).

Amônio solúvel

O amônio solúvel na folha foi extraído em água quente (100 ºC). A quantidade de amônio foi determinada pelo método colorimétrico, utilizando curva padrão (FELKER, 1977; WEATHERBURN, 1967).

Teor de ureia

A ureia na folha foi extraída por solução ácida diluída, seguida de incubação a 99 ºC. A quantidade de ureia foi determinada pelo método colorimétrico, utilizando curva padrão (KOJIMA et al., 2007).

Teor de aminoácidos totais solúveis

Os aminoácidos totais solúveis foram extraídos em solução alcoólica, seguida de incubação a 100 ºC. A quantidade aminoácidos totais foi determinada pelo método colorimétrico, utilizando curva padrão (BEZERRA NETO; BARRETO, 2011).

Estresse oxidativo

O estresse oxidativo será avaliado pela peroxidação lipídica por meio da quantificação do teor de malondialdeído (MDA), extraído com ácido tiobarbitúrico e ácido tricloroacético e determinado pelo método colorimétrico (HEATH; PACKER, 1968).

Nutrientes

Após atingir peso constante, as amostras secas do limbo da folha +1 e provenientes da avaliação da biomassa, foram processadas em moinho de facas, peneiradas em malha de 1 mm (aspecto de pó). O material vegetal moído foi analisado quanto ao teor total de N e Ni, seguindo metologia proposta pela Embrapa (SILVA, 2009).

O nutriente acumulado na biomassa seca foi obtido pela Equação 4, considerando o teor do nutriente determinado no tecido do componente (fv - folha verde, fs - folha seca, po - ponteiro) e a biomassa seca (BS) de cada componente.

Equação 4

$$Nutriente\ acumulado\ (kg\ ha^{-1}) = (Teor_{fv} * BS_{fv}) + (Teor_{fs} * BS_{fs}) + (Teor_{po} * BS_{po})$$

Nitrogênio total

O método utilizado foi o Kjeldahl, em que a amostra foi submetida à digestão sulfúrica, na presença de H_2O_2, seguida de destilação e titulação com solução ácida diluída. O volume de ácido utilizado na titulação corresponde ao teor de N total da amostra (SILVA, 2009).

Níquel total

O Ni no tecido vegetal foi extraído com mistura de peróxido de hidrogênio e ácido nítrico (relação 2:1), seguindo as etapas de pré-digestão por 16 h em capela e banho maria por 3 h a 95 ºC. A determinação de Ni no extrato ácido foi realizada em ICP-OES, utilizando curva padrão utilizada para calibração do equipamento (SILVA, 2009).

4.2.8. *Análise estatística*

Os dados foram analisados quanto aos critérios da análise de variância (ANOVA) e transformados quando necessário. Dados normais e homocedásticos foram submetidos ao teste de ANOVA ($p \leq 0,05$), e quando significativos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

4.3. Resultados

Até 18 dias APF, a pulverização foliar promoveu alterações nas folhas tratadas quanto ao teor de amônio solúvel e aminoácidos solúveis (**Tabela 12**), e teor de N e Ni (**Tabela 13**). E os índices de clorofila avaliados não foram modificados pela pulverização foliar de ureia e Ni (**Tabela 14**).

Aos 50 dias APF, a pulverização modificou os índices de clorofila (**Tabela 14**) e o acúmulo de biomassa da parte aérea (**Tabela 16**). Nesse momento de coleta, o teor de amônio esteve abaixo do limite de detecção (**Tabela 12**).

Na colheita, a pulverização modificou o acúmulo de biomassa seca e de Ni na parte aérea (**Tabela 17**). Entre as variáveis de qualidade industrial, a produtividade de açúcar foi influenciada pela combinação ureia+Ni (**Tabela 18**).

O teor de ureia foi abaixo do limite de detecção em mais de 90 % das amostras nos três períodos de coleta. Não houve efeito da pulverização sobre as variáveis teor de malondialdeído (MDA) (**Tabela 12**), altura e diâmetro (**Tabela 15**).

Tabela 12 – Análise de variância das variáveis bioquímicas avaliadas na folha +1 da cana-de-açúcar, após a pulverização foliar com Ni e ureia

Fator	Atividade da urease (AU)	Amônio solúvel (AS)	Aminoácidos solúveis (AA)	MDA
	-------- µmol NH_4^+ g^{-1} MF h^{-1} --------		µmol g^{-1} MF	nmol g^{-1} MF
	2 dias APF			
Ni	$1,91^{ns}$	$1,10^{ns}$	$0,31^{ns}$	0,08
U	$0,45^{ns}$	**$14,25^{**}$**	**$13,32^{**}$**	2,04
Ni*U	$2,07^{ns}$	$1,07^{ns}$	$0,28^{ns}$	1,71
CV (%)	39,4	$^{1}40,8$	$^{1}24,9$	19,3
Média	49,7	10,4	4,7	3,2
	18 dias APF			
Ni	$0,39^{ns}$	$0,59^{ns}$	**$8,02^{**}$**	$0,29^{ns}$
U	$1,79^{ns}$	$3,30^{ns}$	$0,67^{ns}$	$0,55^{ns}$
Ni*U	$2,45^{ns}$	$1,87^{ns}$	$1,14^{ns}$	$0,72^{ns}$
CV (%)	$^{2}66,3$	$^{2}38,5$	39,9	15,8
Média	11,6	1,0	3,6	3,5
	50 dias APF			
Ni	$0,46^{ns}$	-	$0,70^{ns}$	$1,55^{ns}$
U	$1,46^{ns}$	-	$0,36^{ns}$	$1,09^{ns}$
Ni*U	$0,48^{ns}$	-	$1,87^{ns}$	$0,19^{ns}$
CV (%)	53,0	-	$^{1}28,5$	16,8
Média	37,1	-	3,0	3,7

Ni: Níquel. U: ureia. Teste F: ^{ns}não significativo; **($p \leq 0,05$). APF: após pulverização foliar. Dados transformados em $^{1}(\sqrt[3]{x})$, $^{2}(\sqrt{(x+0,5)})$.

Tabela 13 – Análise de variância do teor de nutrientes na folha +1 da cana-de-açúcar, após a pulverização foliar com Ni e ureia

Fator	2 dias APF	18 dias APF	50 dias APF
	Nitrogênio (g kg^{-1})		
Ni	$0,19^{ns}$	$1,15^{ns}$	**$14,26^{**}$**
U	**$7,35^{**}$**	**$4,48^{**}$**	**$6,19^{**}$**
Ni*U	$1,43^{ns}$	$1,08^{ns}$	$1,94^{ns}$
CV (%)	6,7	13,2	8,9
Média	18,6	13,5	16,3
	Níquel (mg kg^{-1})		
Ni	**$11,61^{**}$**	**$13,70^{**}$**	$0,57^{ns}$
U	$0,97^{ns}$	$0,32^{ns}$	$0,99^{ns}$
Ni*U	$1,15^{ns}$	$0,04^{ns}$	$1,86^{ns}$
CV (%)	58,9	65,1	21,1
Média	15,1	6,8	1,6

Ni: Níquel. U: ureia. Teste F: ^{ns}não significativo; $^{**}(p \leq 0,05)$.

Tabela 14 – Análise de variância dos índices de clorofila a na folha da cana-de-açúcar, após a pulverização foliar com Ni e ureia

Fator	Fluorescência da clorofila a				
	F0	**Fv/F0**	**Fv/Fm**	**φEo**	**IFCa**
	2 dias APF				
Ni	$0,28^{ns}$	$0,77^{ns}$	$0,75^{ns}$	$0,73^{ns}$	$0,43^{ns}$
U	$0,51^{ns}$	$0,33^{ns}$	$0,44^{ns}$	$0,35^{ns}$	$1,02^{ns}$
Ni*U	$1,30^{ns}$	$0,14^{ns}$	$0,18^{ns}$	$0,18^{ns}$	$0,87^{ns}$
CV (%)	9,0	22,5	7,1	12,0	13,4
Média	4.907	2,40	0,70	0,46	23,12
	50 dias APF				
Ni	$2,81^{ns}$	$0,62^{ns}$	$0,68^{ns}$	$1,03^{ns}$	$1,54^{ns}$
U	$1,03^{ns}$	$0,58^{ns}$	$0,68^{ns}$	$1,35^{ns}$	$3,76^{**}$
Ni*U	**$7,06^{**}$**	$1,42^{ns}$	$1,05^{ns}$	$0,37^{ns}$	**$4,18^{**}$**
CV (%)	4,9	18,1	6,1	9,6	14,0
Média	4.861	2,23	0,68	0,45	18,5

Ni: Níquel. U: ureia. F0: fluorescência inicial. Fv/F0: rendimento quântico variável. Fv/Fm: rendimento quântico máximo. φEo: rendimento quântico do transporte de elétrons. IFCt: Índice Falker de clorofila total. Teste F: ^{ns}não significativo; $^{**}(p \leq 0,05)$.

Tabela 15 – Análise de variância das medidas de altura e diâmetro da cana-de-açúcar, após a pulverização foliar com Ni e ureia

Fator	50 dias APF				330 DAC	
	Altura (m)	**Diâmetro do entrenó** (cm)			**Altura** (m)	**Diâmetro do colmo** (cm)
		F+1	**F+2**	**F+3**		
Ni	$3,26^{ns}$	$0,02^{ns}$	$0,23^{ns}$	$0,35^{ns}$	**$13,53^{**}$**	$0,77^{ns}$
U	$0,15^{ns}$	$0,94^{ns}$	$0,29^{ns}$	$0,57^{ns}$	$2,42^{ns}$	$0,07^{ns}$
Ni*U	$0,90^{ns}$	$0,64^{ns}$	$0,28^{ns}$	$0,37^{ns}$	$2,57^{ns}$	$0,83^{ns}$
CV (%)	4,8	15,5	11,7	9,9	3,38	7,1
Média	2,1	1,3	1,6	1,8	2,19	2,0

Ni: Níquel. U: ureia. DAC: dias após o corte. Teste F: ^{ns}não significativo; $^{**}(p \leq 0,05)$.

Tabela 16 – Análise de variância do acúmulo de biomassa seca dos componentes da cana-de-açúcar, aos 50 dias após a pulverização foliar com Ni e ureia

Fator	Massa seca			
	Folhas verdes	**Folhas secas**	**Colmos**	**Parte aérea**
	---------- Mg ha^{-1} ----------			
Ni	2,73^{ns}	1,39^{ns}	1,78^{ns}	**4,71****
U	0,25^{ns}	1,18^{ns}	0,41^{ns}	0,06^{ns}
Ni*U	0,35^{ns}	0,97^{ns}	0,35^{ns}	0,36^{ns}
CV (%)	31,5	28,7	31,2	22,8
Média	5,0	3,9	16,9	25,8

Ni: Níquel. U: ureia. DAC: dias após o corte. Teste F: ^{ns}não significativo; **($p \leq 0,05$).

Tabela 17 – Análise de variância da produtividade, acúmulo de biomassa seca e de nutrientes na parte aérea da cana-de-açúcar após a pulverização foliar com Ni e ureia, no final do ciclo de produção (330 DAC)

Fator	TCH	Biomassa seca	Nitrogênio	Níquel
	---------- Mg ha^{-1} ----------		---------- kg ha^{-1} ----------	
Ni	2,45^{ns}	**4,05****	1,07^{ns}	**28,7****
U	2,2^{ns}	1,57^{ns}	0,10^{ns}	0,28^{ns}
Ni*U	0,96^{ns}	0,97^{ns}	0,92^{ns}	0,04^{ns}
CV (%)	22,6	23,7	28,6	^{1}19,8
Média	129,7	54,8	182,6	39,0

Ni: Níquel. U: ureia. TCH: toneladas de colmo por hectare. Teste F: ^{ns}não significativo; **($p \leq 0,05$). Dados transformados em $^{1}(\sqrt[3]{x})$.

Tabela 18 – Análise de variância dos atributos de qualidade agroindustrial da cana-de-açúcar pulverizada com Ni e ureia via foliar, no final do ciclo de produção (330 DAC)

Fator	PC	POL	Ar Cana	Pureza	Fibra	ATR	TPH
	---------- % ----------					kg Mg^{-1}	Mg ha^{-1}
Ni	0,82^{ns}	0,45^{ns}	0,42^{ns}	0,37^{ns}	1,59^{ns}	0,87^{ns}	0,75^{ns}
U	0,70^{ns}	0,35^{ns}	0,32^{ns}	0,29^{ns}	1,35^{ns}	0,77^{ns}	1,50^{ns}
Ni*U	1,53^{ns}	1,70^{ns}	0,49^{ns}	0,51^{ns}	0,80^{ns}	1,45^{ns}	**6,36****
CV (%)	6,9	6,0	24,0	3,1	8,5	6,3	9,3
Média	15,6	19,4	0,6	87,7	14,9	149,4	10,9

Ni: Níquel. U: ureia. PC: pol da cana. POL: açúcares polarizados. Ar: açúcares redutores. ATR: açúcar total recuperado. TPH: tonelada de pol por hectare. Teste F: ^{ns}não significativo; **($p \leq 0,05$).

4.3.1. *Bioquímica do metabolismo de ureia*

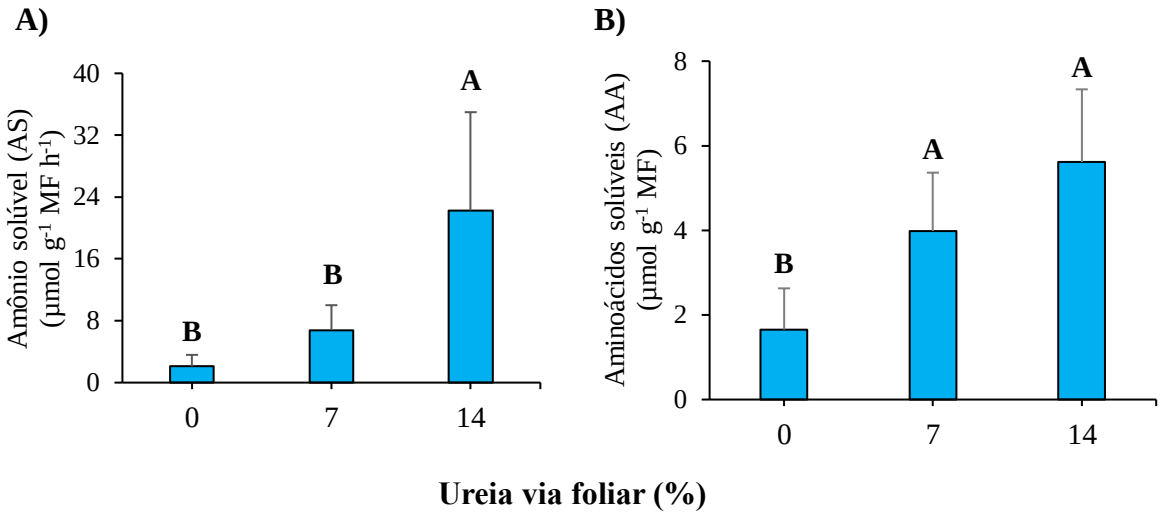
A atividade da urease (AU) não diferiu entre os tratamentos em nenhum dos momentos de coleta, apresentando atividade média de 49,7 mmol g^{-1} MF h^{-1} aos 2 dias APF, 11,6 mmol g^{-1} MF h^{-1} aos 18 dias APF e 37,1 mmol g^{-1} MF h^{-1} aos 50 dias APF (**Tabela 12**).

Aos 2 dias APF, a dose 7 % de ureia não modificou o teor de AS. Já a dose 14 % de ureia aumentou em 150 % o teor de amônio solúvel (AS), que chegou a 22,3 µmol NH_4^+ g^{-1} MF h^{-1} (**Figura 25 - A**). O teor de aminoácidos (AA) aumentou em 274 % com a pulverização foliar de ureia em relação ao controle. O aumento da dose não modificou o AA, e doses de 7 % e 14 % apresentaram teor médio de 6,17 µmol AA g^{-1} MF (**Figura 25 - B**).

Aos 18 dias, AS foi cerca de 5 vezes menor que aos 2 dias APF, e efeito da pulverização não foi mantido. Já AA foi reduzindo em 50 % pela pulverização com 25 g ha^{-1} de Ni. O aumento da dose de Ni aumentou o teor de aminoácidos para níveis semelhantes ao controle, com média de 4,38 µmol g^{-1} MF (**Figura 26**).

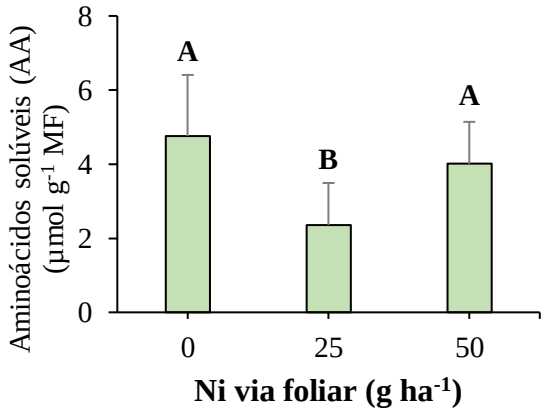
Aos 50 dias, AS foi abaixo do limite de detecção, e os AA não foram modificados pela pulverização (**Tabela 12**).

Figura 25 – Teor de amônio solúvel e aminoácidos solúveis na folha +1 da cana-de-açúcar, aos 2 dias após pulverização foliar com Ni e ureia



Médias seguidas da mesma letra maiúscula entre as doses de ureia e minúscula entre as doses de Ni, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Figura 26 – Teor de aminoácidos solúveis na folha +1 da cana-de-açúcar, aos 18 dias após pulverização foliar com Ni e ureia



Médias seguidas da mesma letra maiúscula entre as doses de ureia e minúscula entre as doses de Ni, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

4.3.2. *Índices de clorofila a*

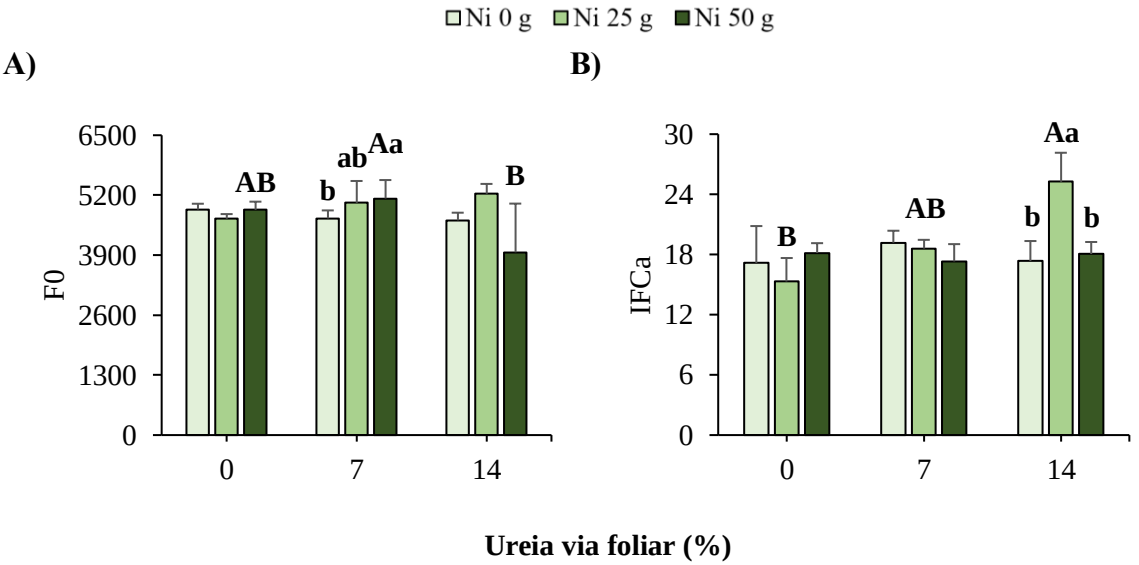
Fluorescência da clorofila a

Aos 50 dias, a adição de 50 g ha^{-1} de Ni na pulverização com 7 % de ureia aumentou o a fluorescência inicial (F0) em 15 %, comparado a pulverização isolada de 7 % de ureia. O aumento da dose de ureia para 14 % de ureia reduziu F0 ao nível do controle (**Figura 27 - A**).

Índice Falker de clorofila a (IFCa)

Aos 50 dias, a dose 14 % de ureia + 25 g ha^{-1} de Ni apresentou o maior IFCa, cuja média foi 31,32. Essa média foi 47 % maior que o controle, 41 % maior que a não adição de Ni, e 37 % maior que o aumento da dose de Ni (**Figura 27 - B**).

Figura 27 – Índices de clorofila a na folha da cana-de-açúcar, aos 50 dias após a pulverização foliar com Ni e ureia



F0: Fluorescência inicial. IFCa: Índice Falker de clorofila a. Médias seguidas da mesma letra maiúscula entre as doses de ureia e minúscula entre as doses de Ni, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

4.3.3. *Nutrientes na folha +1*

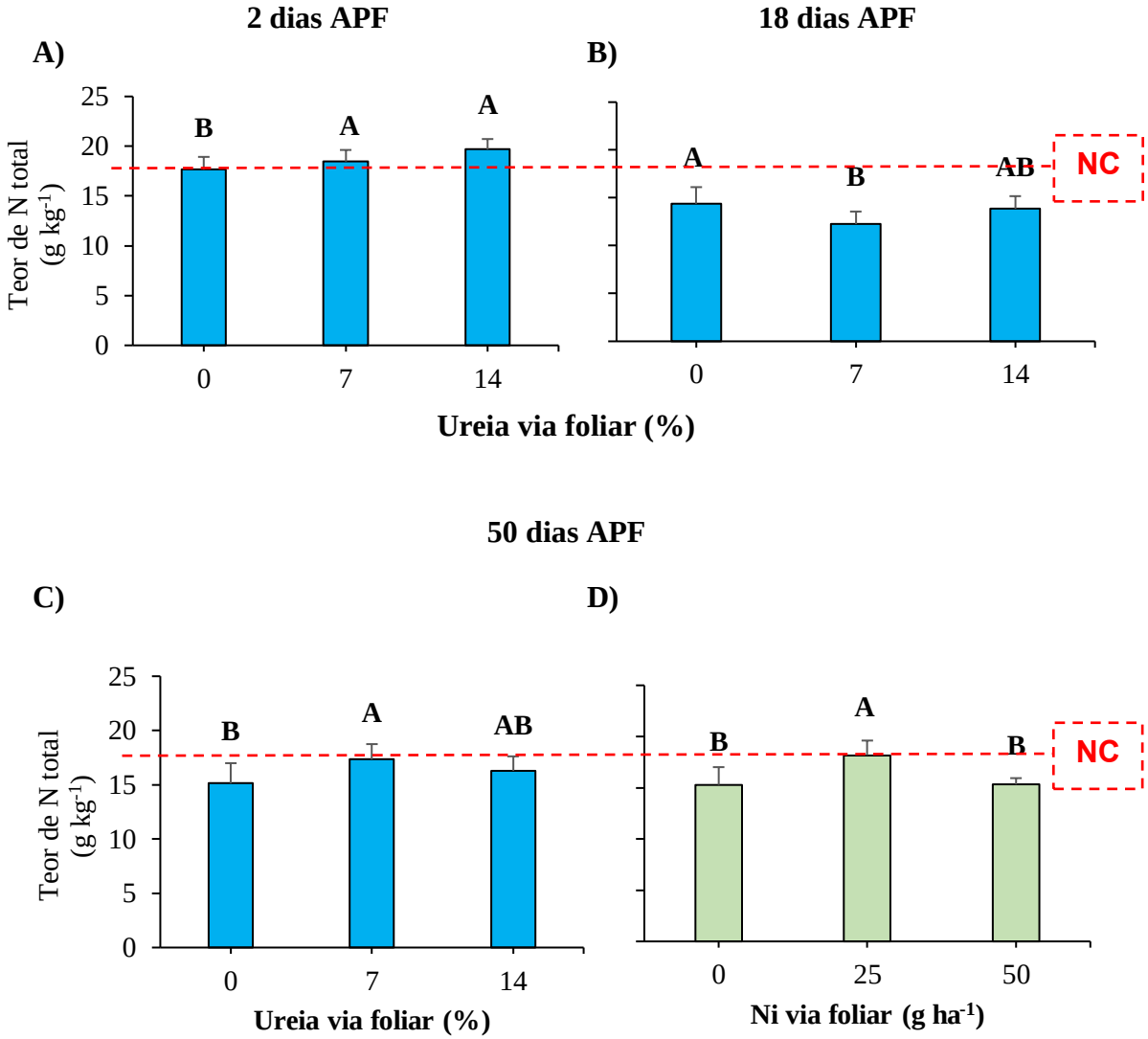
Teor de N total na folha

Aos 2 dias APF, a dose de 7% promoveu aumento de 8 % em relação ao controle, e não diferiu da dose de 14 %. O controle apresentou teor de 17 g kg^{-1} de N, e a pulverização com ureia resultou em teor médio de 19 g kg^{-1} de N (**Figura 28 - A**).

Aos 18 dias APF, as folhas que receberam a pulverização foliar com ureia apresentaram teor foliar de N total 14 % mais baixo que o controle (**Figura 28 - B**).

Aos 50 dias APF, tanto ureia quanto Ni modificaram o teor de N total na folha +1 não tratada. As plantas pulverizadas com ureia apresentaram teor médio de 16,8 g kg^{-1}, o que foi 11 % superior ao controle (**Figura 28 - C**). O mesmo aconteceu para a pulverização de 25 g ha^{-1} de Ni, cujo ganho foi de 19 % em relação ao controle, atingindo 18 g kg^{-1} (**Figura 28 - D**). O aumento da dose de Ni resultou em teor foliar de N total semelhante ao controle (15 g kg^{-1}).

Figura 28 – Teor de nitrogênio (N) total na folha +1 da cana-de-açúcar, após a pulverização foliar com Ni e ureia



NC: nível crítico estabelecido por Silva et al. (2017). Médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

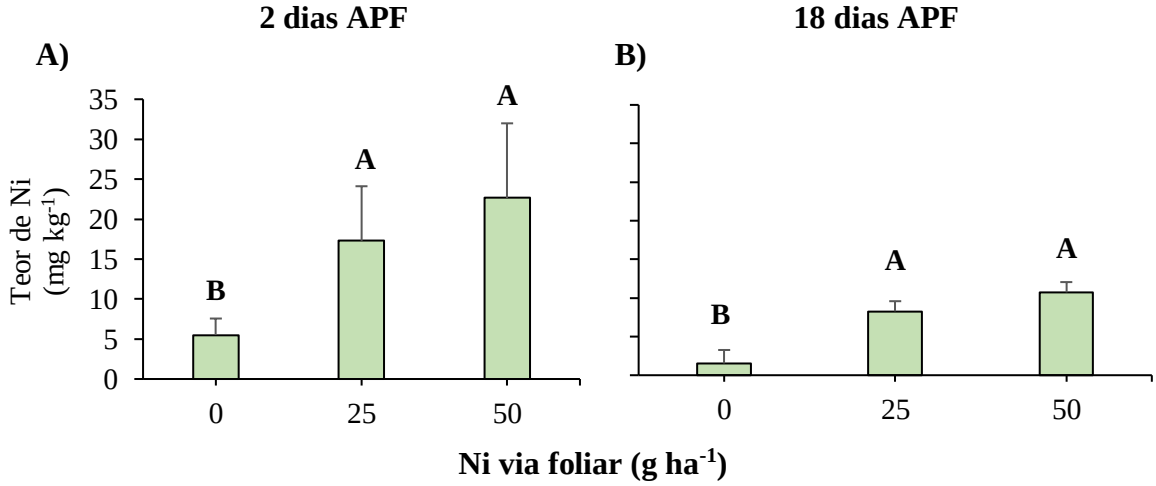
Teor de Ni na folha

A pulverização com ureia não modificou o teor foliar de Ni, que foi modificada apenas pela adição isolada de Ni até 18 dias APF, e o aumento da dose não aumentou o teor foliar de Ni (**Figura 29**).

Aos 2 dias APF, a pulverização com Ni aumentou o teor foliar de 5,5 mg kg^{-1} para 20 mg kg^{-1} de Ni (**Figura 29 - A**). Aos 18 dias APF ocorreu o mesmo comportamento foi observado aos 2 dias APF. Nesse momento da coleta, os teores foliares foram mais baixos: o controle apresentou teor de 1,52 mg kg^{-1} de Ni e as folhas pulverizadas com Ni apresentaram teor médio de 9,50 mg kg^{-1} de Ni (**Figura 29 - B**).

Aos 50 dias não houve efeito da pulverização no teor de Ni das novas na folha +1 que foram emitidas após a pulverização, e o teor foliar médio foi de 1,6 mg kg^{-1} de Ni (**Tabela 13**).

Figura 29 – Teor de níquel (Ni) na folha +1 da cana-de-açúcar, após a pulverização foliar com Ni e ureia



Médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

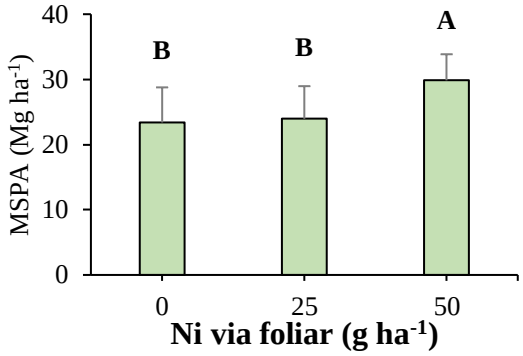
4.3.4. *Biometria*

O perfilhamento médio foi de 13,6 colmos m^{-1} e o peso médio dos colmos foi de 0,68 kg $colmo^{-1}$. Aos 50 dias APF, a pulverização com 50 g ha^{-1} de Ni aumentou em 27 % a biomassa seca da parte aérea (MSPA), atingindo 29,8 Mg ha^{-1} (**Figura 30**).

Na colheita, a altura das plantas pulverizadas com 25 g ha^{-1} de Ni foi de 2,27 m, 9 cm maior (+ 4 %) em relação ao controle e dose maior de Ni (**Figura 31 - A**).

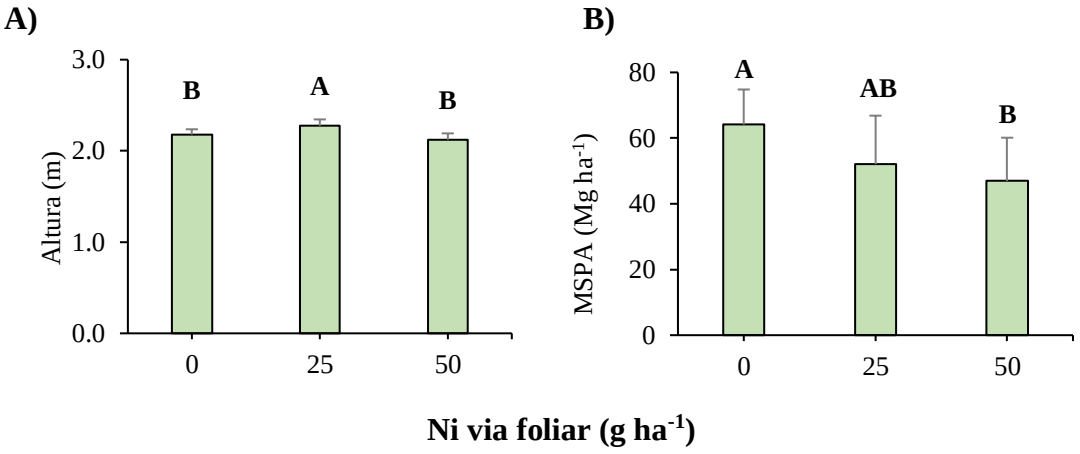
A pulverização com 50 g ha^{-1} de Ni reduziu em 27 % a produção de MSPA, resultando 17 Mg ha^{-1} a menos em relação ao controle, cuja média de foi 64,1 Mg ha^{-1} (**Figura 31 - B**).

Figura 30 – Produção de biomassa seca da parte aérea aos 50 dias após a pulverização foliar com Ni e ureia



MSPA: Massa seca da parte aérea. Médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Figura 31 – Biometria da parte aérea da cana-de-açúcar pulverizada com Ni e ureia via foliar, no momento da colheita



MSPA: Massa seca da parte aérea. Médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

4.3.5. *Acúmulo de nutrientes na parte aérea*

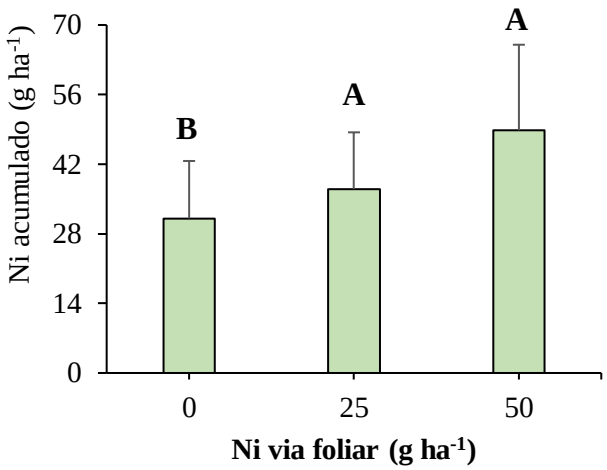
A pulverização não modificou a quantidade de nitrogênio acumulado na parte aérea, cuja média foi de 129 kg ha^{-1} (**Tabela 17**). Já o acúmulo de Ni aumentou em 38 % com a pulverização com Ni, que atingiu a média de 42,9 g ha^{-1}, independente da dose de Ni. O controle apresentou acúmulo de 31 g ha^{-1} de Ni (**Figura 32**).

4.3.1. *Rendimento e qualidade industrial*

A pulverização não modificou o TCH e as variáveis de qualidade industrial. As plantas apresentaram pureza de 87 %, fibra de 14 %, Ar de 0,6 % e 149 kg Mg^{-1} de ATR, o que resultou na estimativa média de produtividade de colmos de 129 Mg ha^{-1} (**Tabela 18**).

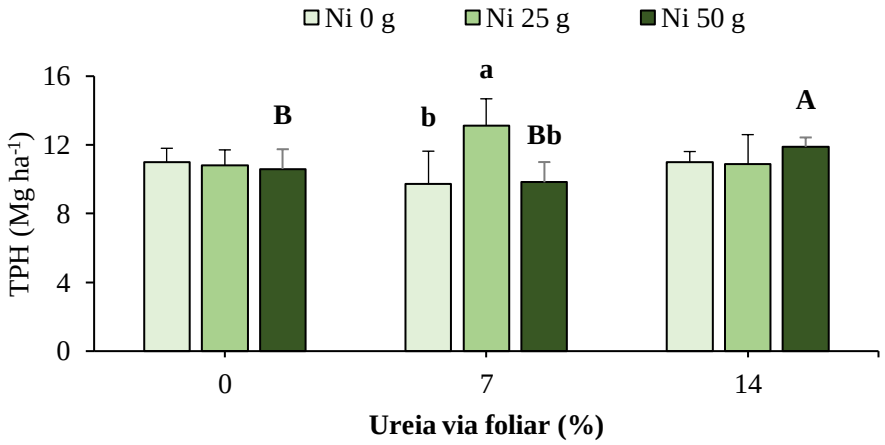
Apenas a produtividade de Pol (TPH) foi modificada pela pulverização, quando combinou ureia+Ni. O aumento da dose de ureia promoveu aumento de 21 % em TPH na combinação com 50 g ha^{-1} de Ni, e a adição de Ni aumentou em 31 % o TPH na combinação com 7 % de ureia (**Figura 33**).

Figura 32 – Níquel (Ni) acumulado na biomassa seca da parte aérea no final do ciclo de produção da cana-de-açúcar, após a pulverização foliar com Ni e ureia



Médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Figura 33 – Produtividade de açúcar na colheita da cana-de-açúcar, após a pulverização com Ni e ureia



Médias seguidas da mesma letra maiúscula entre as doses de ureia e minúscula entre as doses de Ni, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

4.4. Discussão

O ciclo de cultivo do experimento ocorreu no ano de 2022, que apresentou inverno com maior volume de chuvas que o normal. No período planejado para a aplicação foliar, a chuvas foram constantes, de forma que a pulverização ocorreu em plantas após a janela ótima em relação à fase de crescimento. A pulverização ocorreu após 180 dias, quando a RB92579 está em plena fase de crescimento de colmos (ganho de biomassa) e ainda mantém alta demanda por N (WANDERLEY et al., 2021).

A condição ambiental também favoreceu a ocorrência de pragas típicas, como cigarrinha-das-folhas e ferrugem. Porém, no momento de aplicação as plantas já se apresentavam em recuperação, apenas com o vestígio da ocorrência das pragas.

A pulverização foi realizada utilizando redutor de pH e adjuvante surfactante para acelerar a absorção (**Tabela 11**). No dia da pulverização, o céu estava parcialmente nublado, com temperatura de 26 ºC e umidade relativa do ar de 63 %, tendo ocorrido 1 mm de precipitação. O próximo evento de chuva ocorreu dois dias depois da aplicação, com 30 mm. Nos 3 dias seguintes à aplicação, a umidade relativa do ar média se manteve acima de 56 %, com média de 65 %, e a temperatura média de 25 ºC. Essas condições são favoráveis à absorção foliar e à retenção de umidade da gota. No caso da ureia, essas condições favorecem a absorção rápida, reduzindo a possibilidade de volatilização de amônia (FERNANDÉZ et al., 2017; NIU et al., 2020; WESELY et al., 1987).

4.4.1. *Metabolismo da ureia*

O teor de ureia na folha não pôde ser quantificado por estar abaixo do limite de detecção em todos os momentos de coleta, e a AU não foi modificada pela pulverização. A evidência da hidrólise da ureia foi o aumento de AS e AA em plantas pulverizadas com ureia (**Figura 25**). Aos 2 dias APF, a dose 14 % de ureia resultou em teor de 22,3 µmol NH_4^+ g^{-1} MF h^{-1} (**Tabela 12**), sem comprometer a fluorescência da clorofila (**Tabela 14**), sem sintomas visuais típicos de dano na folha (APÊNDICE C - 3). A ausência de estresse severo sugere que a cana-de-açúcar tolera níveis altos de amônio, ratificado pela ausência de acúmulo de MDA (**Tabela 12**).

As plantas C4 apresentam estratégias de metabólicas para tolerar níveis altos de amônio. A separação espacial das etapas da fotossíntese no limbo e bainha do feixe minimiza de forma relevante a exposição das reações fotoquímicas ao amônio em excesso (BOSCHIERO et al., 2019; CIPRIANO et al., 2021). A alta concentração e eficiência dos transportadores de amônio e a atividade da rota GS/GOGAT permitem que o amônio possa ser redistribuído rapidamente e preferencialmente absorvido, com custo energético mais baixo que o nitrato, cuja assimilação

envolve duas etapas a mais, a nitritação e nitratação (BOSCHIERO et al., 2019; CIPRIANO et al., 2021; SHILPHA; SONG; JEONG, 2023; YANG et al., 2019).

Aos 2 dias APF, a dose 7 % de ureia não diferiu do controle quanto ao AS (**Figura 25 - A**), mas gerou AA semelhante à dose de 14 % de ureia (**Figura 25 - B**). Isso indica rápida assimilação do amônio e que a dose de ureia fornecida atendeu a demanda de atividade da GS. A dose 14 % de ureia indica que o aumento da dose ultrapassou o limite de atividade de assimilação, uma vez que produziu AA semelhante à 7 % de ureia, mas ainda manteve AS não acumulado (**Figura 25**).

Aos 18 dias APF, não houve efeito dos tratamentos para AS, e redução da média geral de AS em 10 vezes, chegando a 1,0 µmol NH_4^+ g^{-1} MF h^{-1}, em comparação aos 2 dias APF (**Tabela 12**). Isso indica rapidez de transporte dos solutos, e que o AS acumulado pela dose 14 % de ureia pode ser assimilado e transportado dentro de 18 dias. Nesse momento de coleta houve redução de AA com a dose 25 g ha^{-1} de Ni aos 18 dias APF (**Figura 26**), o que implica em estímulo da remobilização dos aminoácidos para outras partes da planta, tendo em vista o papel ativador do Ni sobre o metabolismo de N (ZHANG et al., 2022)

A dose 50 g ha^{-1} promoveu AA semelhantes ao controle (**Figura 27 - A**), aos 18 dias APF. O acúmulo de AA pode ser interpretado como mecanismo de resposta ao estresse, aumentando a produção de AA específicos de defesa ou de reserva, de acordo com o estímulo ambiental e fisiológico (TROVATO et al., 2021). O acúmulo da fração solúvel pode indicar que os aminoácidos formados não estão sendo utilizados.

A concentração relativa dos aminoácidos permite identificar o mecanismo fisiológico estimulado pelos tratamentos. Doses menores de N (10 % e 20 % de ureia) estimulam a formação de novos aminoácidos com maior concentração de glutamina. Já doses altas de N, (40 % de ureia) direcionam a formação de aminoácidos de reserva de curto prazo de N, com alta mobilidade na planta e metabolização rápida, como asparagina e ácido aspártico (CASTRO et al., 2022). Nesse sentido, embora AA tenha sido semelhante, o Ni provavelmente estimulou outros mecanismos na planta que alteraram a MSPA (**Figura 30**), aos 50 dias APF, em relação ao controle.

4.4.2. *Avaliação do estresse*

O estresse quantificado pelo teor de MDA apresentou teor médio de 3,5 nmol g^{-1} MF, independente dos tratamentos e momento de coleta (**Tabela 12**). Esse teor indica estresse leve, uma vez que plantas de em condições de estresse apresentam médias acima de 10 nmol g^{-1} MF de MDA (RAMPAZZO et al., 2019; TEIXEIRA et al., 2022).

Logo depois da aplicação (2 dias) não houve dano ao aparato fotossintético (**Tabela 14**). Aos 50 dias APF, as folhas de plantas que receberam 50 g ha^{-1} de Ni apresentaram alteração do padrão de fluorescência da clorofila a (**Figura 27**). Esse resultado indica remobilização no Ni e da ureia para folhas novas e mostra o efeito da pulverização no tempo, não limitado às folhas ou ao período de aplicação. Também reforça a necessidade de avaliação criteriosa da dose de Ni na cana-de-açúcar, bem como a melhor combinação Ni+ureia para melhor desempenho da cultura com esse manejo.

A fluorescência reflete a capacidade de captação de luz, dissipação e transferência de energia, até a fixação de carbono durante a fotossíntese. Mudanças no padrão da fluorescência implicam na alteração do processo fotossintético como um todo, e avaliação da ocorrência dessa mudança consiste num método de alta sensibilidade para identificação de distúrbios metabólicos *in vivo* (BAKER, 2008).

Em folhas com menor aporte de ureia (7 % de ureia), o aumento da dose de Ni prejudicou a fluorescência inicial (F0), enquanto o maior aporte de ureia produziu o efeito oposto (**Figura 27**). O aumento da fluorescência inicial implica dano no aparato fotossintético, que é um dos efeitos negativos atribuídos à toxidez de Ni devido à síntese de espécies reativas de oxigênio (EROs) e comprometimento da atividade de enzimas (SREEKANTH et al., 2013; HASSAN et al., 2019).

O aumento de F0 implica na captação de energia além do que o complexo antena é capaz de processar. Essa perda pode estar associada à perda de receptores ou na redução da capacidade de dissipação da energia do aparato fotossintético. A energia em excesso é então convertida em fluorescência (BAKER, 2008). Isso implica em menor quantidade de energia para a sequência de reações da fotossíntese, o que ocorre em plantas submetidas à estresse (DIAS et al., 2024). Ou seja, a combinação 50 g ha^{-1} de Ni + 7 % de ureia reduziu a eficiência fotossintética das plantas após 50 dias da pulverização, embora não tenha expressado sintomas.

A redução de F0 é um efeito positivo e no caso apresentado, retornou para o nível do controle (**Figura 27 - A**). Isso indica que o aumento da dose de Ni deve ser acompanhado de aumento do suprimento de ureia para evitar danos ao aparato fotossintético.

4.4.3. *Nutrição e produção de biomassa da parte aérea*

Nutrição com N

No momento da pulverização, as plantas estavam em estágio avançado de desenvolvimento (180 dias) e apresentavam teor foliar de 17 g kg^{-1} de N. Segundo Silva et al. (2021), esse teor corresponde ao nível crítico médio para cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste, de forma que as plantas apresentavam nutrição nitrogenada adequada. A pulverização promoveu incremento de N para 19 g kg^{-1} de N aos 2 dias APF, o que significa que houve melhoria do estado nutricional, mas sem efeito para o aumento da dose de ureia (**Figura 28 - A**). Cerqueira et al. (2019) também identificaram aumento do teor foliar de N após pulverização foliar de doses baixas de ureia.

Aos 18 dias, as plantas apresentaram redução geral dos teores de N, com média de 13 g kg^{-1} de N entre as plantas pulverizadas, o que representou redução de 14 % em relação ao controle (**Figura 28 – B**). Aos 2 dias APF a média foi 18 g kg^{-1} de N (**Tabela 13**). Castro et al. (2023) também identificaram redução do teor foliar de N aos 20 dias APF com ureia.

Aos 50 dias APF, houve aumento da média geral dos teores foliares de N em relação aos 18 dias APF (**Tabela 13**). Nesse momento, a pulverização isolada de Ni e ureia promoveram melhoria do estado nutricional da cana-de-açúcar (**Figura 28**), no entanto apenas a pulverização com 25 g ha^{-1} de Ni superou o nível crítico de N, atingindo 18 g kg^{-1} (**Figura 28 - D**). Isso foi confirmando pelo aumento do IFCa com a dose 25 g ha^{-1} de Ni (**Figura 27 - B**). Segundo essa variável, a melhor combinação para nutrição nitrogenada da cana-de-açúcar foi 7 % de ureia + 25 g ha^{-1} de Ni, com contribuição do Ni de 47 % para o aumento do índice, reforçando o papel do Ni para o aumento do teor de N na folha. Doses baixas de Ni estimulam o metabolismo de N, fotossíntese e mecanismos de defesa, o que resulta no crescimento das plantas. Urease, GS e nitrato redutase podem ser estimuladas pelo Ni, bem como a síntese de clorofilas e os processos fotossínteticos (SHAHZAD et al., 2018; ZHANG et al., 2022).

Apesar do aumento do teor foliar de N, a pulverização não modificou a produção de biomassa nem o acúmulo de N na biomassa da parte aérea (Tabelas **Tabela 16** e **Tabela 17**). Isso indica que a planta absorveu, mas não converteu o N em biomassa. Na fase de aplicação, a variedade RB92579 iniciava redução da demanda por N e da produção de biomassa da parte aérea, até o final do ciclo, conforme descrito por Wanderley et al. (2021). Assim, o N absorvido pelas folhas pode não ter sido direcionado para órgãos de reserva, como rizoma, ao invés de estimular a parte aérea. Trivelin et al. (1988) e Castro et al. (2023) identificaram que parte do N fornecido via foliar é mobilizado para as raízes. Silveira et al. (2021) mostraram que a

arginina, principal forma de armazenamento de N, é direcionada para o rizoma da cana-de-açúcar. Isso pode ocorrer quando a planta apresenta teor adequado de N, como foi identificado na **Figura 28 - C e D**.

Nutrição com Ni

A pulverização com Ni aumentou o teor de Ni da cana-de-açúcar nas folhas pulverizadas, e o aumento da dose de Ni não resulta em maior teor foliar de Ni (**Figura 29**). Esse efeito se manteve até 18 dias APF. A cana-de-açúcar tolerou teores foliares de Ni acima de 10 mg kg^{-1} sem comprometer o aparato fotossintético ou elevar os teores de MDA após a pulverização.

Bezerra (2018) identificou a ocorrência de zonas de deficiência de Ni na região de Tabuleiros costeiros onde o presente estudo foi conduzido. O estudo sugere faixa de suficiência de Ni para ambientes semelhante de 0,35 a 19,50 mg kg^{-1} de Ni, e teor médio 2,38 mg kg^{-1} de Ni. Essa faixa contempla os teores obtidos no presente estudo, mostrando que são valores encontrados e tolerados pela cana-de-açúcar cultivada na região.

As plantas pulverizadas com Ni apresentaram teor de 20 mg kg^{-1} de Ni aos 2 dias APF. A remobilização ocorreu em poucos dias, reduzindo em cerca de 50 % teor foliar em 16 dias (entre 2 dias e 18 dias APF) (**Figura 29**). Após 48 dias, o teor foliar médio foi de 1,6 mg kg^{-1} de Ni. A mobilidade de Ni foi identificada também por Oliveira, Lavres e van der Ent (2021) dentro de 12 dias.

No final do ciclo, o Ni acumulado na parte aérea foi maior em plantas pulverizadas e não foi diferente entre as doses (**Figura 32 –** Níquel (Ni) acumulado na biomassa seca da parte aérea no final do ciclo de produção da cana-de-açúcar, após a pulverização foliar com Ni e ureia). Já a MSPA diferenciou os tratamentos, sendo máxima com dose 50 g ha^{-1} de Ni (**Figura 30**). A biometria realizada aos 50 dias APF é resultado do metabolismo da planta após estímulo da pulverização foliar com ureia e Ni, e esse resultado não era esperado, uma vez que não é sustentando pelas demais variáveis do presente estudo. Esse aumento da MSPA com 50 g ha^{-1} de Ni não esteve associado com teor de N folar, uma vez que esse tratamento apresentou o mesmo teor de N do controle, e 25 g kg^{-1} de Ni que apresentou maior teor de N na folha não promoveu ganho de MSPA (**Figura 28 - D**).

Após a pulverização ocorreu infestação de pragas, e 50 g Ni ha^{-1} pode ter inibido os danos sobre a biomassa avaliada aos 50 dias, cujo crescimento foi produto do estímulo foliar. O papel do Ni sobre amenização de estresse é relatado na literatura, tanto em processos oxidativos quanto não oxidativos (FABIANO et al., 2015; SHAHZAD et al., 2018; RAMPAZZO et al., 2022). O seu papel no estresse biótico foi avaliado por Barcelos et al. (2018), com redução da

infestação fúngica e ativação do sistema de defesa vegetal. É possível que o aumento da dose de Ni tenha promovido melhor desempenho em MSPA devido à amenização do estresse biótico.

No final do ciclo, a dose 50 g ha^{-1} de Ni comprometeu redução da MSPA em relação ao controle (**Figura 31 – B**). Isso pode ser consequência o efeito negativo dessa dose de Ni no aparato fotossintético identificado aos 50 dias APF (**Figura 27 - A**). A dose de 25 g $há^{-1}$ de Ni + 7 % de ureia promoveu crescimento em altura (**Figura 31 – A**), no entanto, isso não se converteu em MSPA (**Figura 31 – B**). A estimativa média de produtividade de colmos (TCH) não foi modificada pelos tratamentos (**Tabela 17**), apesar do efeito negativo da dose alta de Ni sobre MSPA. No momento da colheita, foi observada ocorrência de doença na porção apical, com perda das folhas do ponteiro e murchamento dos entrenós apicais (APÊNDICE E). Isso pode ter comprometido o efeito dos tratamentos sobre o TCH.

4.4.4. *Rendimento industrial da cana-de-açúcar*

Não houve efeito da pulverização foliar sobre as variáveis de qualidade industrial (**Tabela 18**), que indicaram que as plantas estavam maduras e aptas para a colheita.

A combinação ureia+Ni modificou a produtividade de açúcar, com melhor rendimento de Pol para 7 % de ureia + 25 g ha^{-1} de Ni e 14 % de ureia + 50 g ha^{-1} de Ni. Esses tratamentos produziram 13 Mg ha^{-1} e 12 Mg ha^{-1}, respectivamente (**Figura 33**). Os efeitos aditivos dos fatores mostraram que o Ni promoveu maior incremento que a ureia, o que resultou no ganho de 1 Mg ha^{-1} de Pol, em relação à ureia e 3 Mg ha^{-1} de Pol em relação ao controle. Na colheita comercial, o talhão onde foi implantando o experimento apresentou TPH de 9,0 Mg ha^{-1}, semelhante à média do controle.

4.5. Conclusões

A pulverização foliar com ureia e Ni estimula o metabolismo da ureia em plantas, aumentando o teor de amônio e aminoácidos, no entanto esses efeitos não estiveram associados ao aumento da atividade da urase avaliada 2 dias APF.

A pulverização foliar com ureia e Ni modificou o estado nutricional da planta, com aumento do teor foliar de N e Ni. Esse efeito se mantém até 18 dias APF para Ni e até 50 dias APF para ureia.

Houve remobilização do N da ureia e do Ni pulverizados na folha aos 180 DAC, mas somente o Ni estimulou a produção de massa seca da parte aérea (MSPA) aos 50 dias APF.

A combinação ureia+Ni promoveu aumento do IFCa e rendimento de açúcar e rendimento de açúcar da cana-de-açúcar cultivada em campo, e o resultado do aumento da dose Ni, sendo a combinação 7 % de ureia + 25 g ha^{-1} de Ni a que apresentou melhor desempenho. No entanto, o manejo proposto não estimulou a produção da cultura cultivada com dose reduzida de N via solo.

Referências bibliográficas

BAKER, N. R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis *in vivo*. **Annual Review of Plant Biology**, v. 59, n. 1, p. 89-113, 2008.

BARCELOS, J. P. Q.; REIS, H. P. G.; GODOY, C. V.; GRATÃO, P. L.; FURLANI JUNIOR, E.; PUTTI, F. F.; CAMPOS, M.; REIS, A. R. Impact of foliar nickel application on urease activity, antioxidant metabolism and control of powdery mildew (*Microsphaera diffusa*) in soybean plants. **Plant Pathology**, v. 67, n. 7, p. 1502-1513, 2018. http://doi.org/10.1111/ppa.12871

BEZERRA, N. S. **Métodos de diagnose nutricional da cana-de-açúcar fertirrigada na Paraíba**. 2018. 71f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) –Departamento de Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2018.

BEZERRA NETO, E.; BARRETO, L. P. Determinação de aminoácidos livres totais. In: **Análises químicas e bioquímicas em plantas**. Recife: Editora Universitária da UFRPE, 2011, p.84-89.

BOSCHIERO, B. N.; MARIANO, E.; AZEVEDO, R. A.; TRIVELIN, P. C. O. Influence of nitrate-ammonium ratio on the growth, nutrition, and metabolism of sugarcane. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 139, p. 246-255, 2019. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.03.024

BRUNO, I. P.; MORAES, M. F.; DAMIN, V.; DOURADO-NETO, D.; REICHARDTM K. Does nickel influence leaf nitrogen uptake in coffee seedlings?. **Brazilian Journal of Agriculture**, v. 94, n. 3, p. 259-269, 2019. https://doi.org/10.37856/bja.v94i3.3609

CERQUEIRA, G.; SANTOS, M. C.; MARCHIORI, P. E. R.; SILVEIRA, N. M.; MACHADO, E. C.; RIBEIRO, R. V. Leaf nitrogen supply improves sugarcane photosynthesis under low temperature. **Photosynthetica**, Praga, v. 57, n. 1, p. 18-26, 2019. https://doi.org/10.32615/ps.2019.033

CIPRIANO, M. A. P.; FREITAS-IÓRIO, R. P.; DIMITROV, M. R.; ANDRADE, S. A. L.; KURAMAE, E. E.; SILVEIRA, A. P. D. Plant-growth endophytic bacteria improve nutrient use efficiency and modulate foliar N-metabolites in sugarcane seedling. **Microorganisms**, v. 9, n. 3, p. 479, 2021. https://doi.org/10.3390/microorganisms9030479

DEUNER, S.; NASCIMENTO, R.; FERREIRA, L. S.; BADINELLI, P. G.; KERBER, R. S. Adubação foliar e via solo de nitrogênio em plantas de milho em fase inicial de desenvolvimento. **Ciências e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1359-1365, 2008. https://doi.org/10.1590/s1413-70542008000500001

DIAS, M. dos S.; SILVA, F. A.; FERNANDES, P. D.; FARIAS, C. H. A.; LIMA, R. F.; SILVA, M. F. C.; LIMA, V. R. N.; LIMA, A. M.; LACERDA, C. N.; REIS, L. S.; SOUZA, W. B. B.; SILVA, A. A. R.; ARRUDA, T. F. L. Beneficial effect of exogenously applied calcium pyruvate in alleviating water deficit in sugarcane as assessed by chlorophyll a fluorescence technique. **Plants**, v. 13, n. 3, p. 434, 2024. https://doi.org/10.3390/plants13030434

EMBRAPA TABULEIROS COSTEIROS. Delimitação de área de atuação da Embrapa Tabuleiros Costeiros. Relatório Final. OS Nº 09/2014.

FABIANO, C. C.; TEZOTTO, T.; FAVARIN, J. L.; POLACCO, J. C.; MAZZAFERA, P. Essentiality of nickel in plants: a role in plant stresses. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, p. 754, 2015. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00754

FELKER, P. Microdetermination of nitrogen in seed protein extracts with the salicylate-dichloroisocyanurate color reaction. **Analytical Chemistry**, v. 49, n. 7, p. 1080-1080, 1977.

FERNÁNDEZ, V.; BAHAMONDE, H. A.; PEGUERO-PINA, J. J.; GIL-PELEGRÍN, E.; SANCHO-KNAPIK, D.; GIL, L.; GOLDBACH, H. E.; EICHERT, T. Physico-chemical properties of plant cuticles and their functional and ecological significance. **Journal of Experimental Botany**, v. 68, n. 19, p. 5293-5306, 2017. https://doi.org/10.1093/jxb/erx302

FREITAS, D. S.; RODAK, B. W.; REIS, A. R.; REIS, F. B.; CARVALHO, T. S.; SCHULZE, J.; CARNEIRO, M. A. C.; GUILHERME, L. R. G. Hidden nickel deficiency? Nickel fertilization via soil improves nitrogen metabolism and grain yield in soybean genotypes. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 614, p. 1-16, 2018. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00614

HASSAN, M. U.; CHATTHA, M. U.; KHAN, I.; CHATTHA, M. B.; AAMER, M.; NAWAZ, M.; ALI, A.; KHAN, M. A. U.; KHAN, T. A. Nickel toxicity in plants: reasons, toxic effects, tolerance mechanisms, and remediation possibilities—a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, p. 12673-12688, 2019. https://doi.org/10.1007/s11356-019-04892-x

HEATH, R. L.; PACKER, L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, v. 125, p. 189–98, 1968.

HOGAN M. E.; SWIFT, I. E.; DONE, J. Urease assay and ammonia release from leaf tissues. **Phytochemistry**, v. 22, p. 663–7, 1983. https://doi.org/10.1016/s00319422(00)86958-7

HOSSEINI, H.; KHOSHGOFTARMANESH, A. H. The effect of foliar application of nickel in the mineral form and urea-Ni complex on fresh weight and nitrogen metabolism of lettuce. **Scientia Horticulturae**, v. 164, p. 178-182, 2013. http://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.09.030

KOJIMA, S.; BOHNER, A.; GASSERT, B.; YUAN, L.; VON WIRÉN, N. AtDUR3 represents the major transporter for high-affinity urea transport across the plasma membrane of nitrogen-deficient Arabidopsis roots. **The Plant Journal**, v. 52, p. 30–40, 2007. https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2007.03223.x

LIMA NETO, J. F.; DUTRA FILHO, J. A.; SIMÕES NETO, D. E.; SILVA, A. E. P.; SILVA, L. J.; FERREIRA, G. E. Avaliação agroindustrial e parâmetros genéticos de clones UFRPE de cana-de-açúcar no litoral norte de Pernambuco. **Pesquisa Agropecuária Pernambucana**, v. 18, p. 8–13, 2013. https://doi.org/10.12661/pap.2013.003

McCULLOUGH, H. The determination of ammonia in whole blood by a direct colorimetric method. **Clinica Chimica Acta**, v. 17, p. 297–304, 1967. https://doi.org/10.1016/0009-8981(67)90133-7

NIU, J.; LIU, C.; HUANG, M.; LIU, K.; YAN, D. Effects of foliar fertilization: a review of current status and future perspectives. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, p. 104-118, 2021. https://doi.org/10.1007/s42729-020-00346-3

OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, R. I.; FREIRE, M. B. G. S.; SIMÕES NETO, D. E.; SILVA, S. A. M. Extração e exportação ode nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1343-1352, 2010. https://doi.org/10.1590/s0100-06832010000400031

OLIVEIRA, E. C. A.; GAVA, G. J. C.; TRIVELIN, P. C. O.; OTTO, R.; FRANCO, H. C. J. Determining a critical nitrogen dilution curve for sugarcane. **Journal of Plant Nutrition**, v. 176, n. 5, p. 712-723, 2013. https://doi.org/10.1002/jpln.201200133

OLIVEIRA, J. B.; LAVRES, J.; VAN DER ENT, A. In situ analysis of nickel uptake from foliar application in pecan using instrumental µXRF analysis. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, p. 1-9, 2021. https://doi.org/10.1007/s42729-021-00599-6

RAMPAZZO, M. V.; CUNHA, M. L. O.; OLIVEIRA, L. C. A.; SILVA, V. M.; LANZA, M. G. D. B.; MELO, A. A. R.; REIS, A. R. Physiological roles of nickel on antioxidant and nitrogen metabolism increasing the yield of sugarcane plants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 4, p. 4438–4448, 2022. https://doi.org/10.1007/s42729-022-01045-x

RIDESA – REDE INTERUNIVERSITÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROENERGÉTICO. Censo varietal. Censo varietal nacional. Principais variedades. Safra: 2023/2024. Estados: Alagoas, Paraiba/Rio Grande do Norte, Pernambuco, Piauí. <https://www.ridesa.com.br/censo-varietal>. Acesso em Abril/2025.

ROCHA, I. T. M.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, E. C. A.; SOUZA, E. R. S.; FREIRE, M. B. G. S.; SIMÕES NETO, D. E.; SILVA, A. V. Salt effect of potassium fertilizer on productivity and technological quality of sugarcane. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 9, p. 1552-1560, 2019. https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.09.p1919

SANTOS, R. L.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, E. C. A.; BARBOSA, J. A.; MOURA, M. J.; LOPES, N. R. C.; COSTA, L. G. A. F.; GUEDES, V. H. F.; OLIVEIRA, D. M. A.; SANTOS, M. B. C. Sampling of sugarcane leaves in field experiments to determine the activity of nitrate reductase. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 49, n. 1, p. 76-87, 2018. https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1421648

SHAHZAD, B.; TANVEER, M.; REHMAN, A.; CHEEMA, S. A.; FAHAD, S.; REHMAN, S.; SHARMA, A. Nickel; whether toxic or essential for plants and environment - A review. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 132, p. 641-651, 2018. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.10.014

SHILPHA, J.; SONG, J.; JEONG, B. R. Ammonium phytotoxicity and tolerance: An insight into ammonium nutrition to improve crop productivity. **Agronomy**, v. 13, n. 6, p. 1487, 2023. 7. https://doi.org/10.3390/agronomy13061487

SILVA, A. M. de S.; OLIVEIRA, E. C. A.; ANDRADE, J. J.; LIMA, A. M. S.; ALMEIDA, B. G. A.; TRIVELIN, P. C. O.; FREIRE, F. J.; GUIMARÃES, D. H. The leaching potential and recovery of ^{15}N-fertilizer by sugarcane cultivated in sandy soil. **SugarTech**, v. 26, n. 5, p. 1-15, 2024. https://doi.org/10.1007/s12355-024-01479-w

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solo, plantas e fertilizantes**. ed. téc. Fábio Cesar da Silva. 2. edição revista e ampliada – Embrapa Informação Tecnológica. 627 p. Brasília, DF: 2009.

SILVA, L. C. *et al*. Nutrient balance in sugarcane in Brazil: Diagnosis, use and application in modern agriculture. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 14, p. 2167-2189, 2021. https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1889591

SILVEIRA, N. M. *et al*. Leaf arginine spraying improves leaf gas exchange under water deficit and root antioxidant responses during the recovery period. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 162, p. 315-326, 2021. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.02.036

SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, A. C.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S.; OLIVEIRA, E. C. A.; ROCHA, A. T. da. Adubação fosfatada para cana-de-açúcar em solos representativos para o cultivo da espécie no Nordeste brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 1, p. 73-81, 2015. http://doi.org/10.1590/s0100-204x2015000100008

SREEKANTH, T. V. M.; NAGAJYOTHI, P. C.; LEE, K. D.; PRASAD, T. N. V. K. V. Occurrence, physiological responses and toxicity of nickel in plants. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 10, n. 5, p. 1129-1140, 2013. http://doi.org/10.1007/s13762-013-0245-9

STOLF, R. Metodologia de avaliação de falhas nas linhas de cana-de-açúcar. **STAB**, Piracicaba, v. 4, n. 6, p. 22-36, 1986.

TEIXEIRA, P. C. **Manual de métodos de análise de solo**. eds. téc. Paulo Cesar Teixeira [et al.], 3. ed. rev. e ampl. – Embrapa Informação Tecnológica. 573 p. Brasília, DF: 2017.

TEIXEIRA, G. C. M.; PRADO, R. M.; ROCHA, A. M. S.; SOUSA JUNIOR, G. S.; GRATÃO, P. L. Beneficial effect of silicon applied through fertigation attenuates damage caused by water deficit in sugarcane. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 41, p. 3255–3270, 2022. https://doi.org/10.1007/s00344-021-10510-3

TRIVELIN, P. C. O.; CARVALHO, J. G.; SILVA, A. D.; PRIMAVESI, A. D. A.; CAMACHO, E.; EIMORE, I.; GUILHERME, M. R. Adubação foliar de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.): Absorção e translocação de ureia – ^{15}N. **Energia Nuclear na Agricultura**, Piracicaba, v. 9, n. 2, p. 52-65, 1988.

TROVATO, M.; FUNCK, D.; FORLANI, G.; OKUMOTO, S.; AMIR, R. Amino acids in plants: regulation and functions in development and stress defense. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 772810, 2021. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.772810

WANDERLEY, L. R. S.; OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; SIMÕES NETO, D. E.; SANTOS, R. L. Nutritional requirement by irrigated brazilian sugarcane varieties. **SugarTech**, v. 23, n. 4, p. 762-775, 2021. https://doi.org/10.1007/s12355-020-00921-z

WEATHERBURN, M. W. Phenol-hypochlorite reaction for determination of ammonia. **Analytical Chemistry**, v. 39, n. 8, p. 971-974, 1967.

WESELY, R. W.; SHEARMAN, R. C.; KINBACHER, E. J.; LOWRY, S. R. Ammonia volatilization from foliar-applied urea on field-grown Kentucky bluegrass. **HortScience**, v. 22, n. 6, p. 1278-1280, 1987.

YANG, Y.; GAO, S.; JIANG, Y.; LIN, Z.; LUO, J.; LI, M.; GUO, J.; SU, Y.; XU, L; QUE, Y. The physiological and agronomic responses to nitrogen dosage in different sugarcane varieties. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 406, 2019. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00406

YUSUF, M.; FARIDUDDIN, Q.; HAYAT, S.; AHMAD, A. Nickel: an overview of uptake, essentiality and toxicity in plants. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 86, p. 1-17, 2011. https://doi.org/10.1007/s00128-010-0171-1

ZHANG, K.; LI, S.; XU, Y.; ZHOU, Y.; RAN, S.; ZHAO, H.; HUANG, W.; XU, R.; ZHONG, F. Effect of nickel ions on the physiological and transcriptional responses to carbon and nitrogen metabolism in tomato roots under low nitrogen levels. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 19, p. 11398, 2022. https://doi.org/10.3390/ ijms231911398

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados são inovadores quanto ao manejo de Ni na cultura da cana-de-açúcar, no que se refere a crescimento, acúmulo e metabolismo de N, em diferentes condições de cultivo. E mostram que a cana-de-açúcar pode ser manejada com doses de Ni semelhantes àquelas praticadas para plantas leguminosas para estimular a produção da cultura.

O Ni fornecido via foliar não aumentou a atividade da urease da cana-de-açúcar, no entanto, o estímulo do metabolismo da ureia na folha da cana-de-açúcar ocorreu com a pulverização foliar de ureia e Ni, modificando os metabólitos produtos da atividade da urease, e modificando o estado nutricional da planta, com aumento do teor de N e Ni.

O aumento da dose de ureia provocou aumento dos teores de ureia e amônio na folha. Os danos por queima foram identificados quando não houve a redução do pH da calda, e foram mais intensos na dose mais alta de ureia (29 %). O pH da calda pode ter condicionado a ação urease presente na superfície da folha, gerando estresse salino por excesso de amônio. Além disso, o pH alcalino pode ter causado desestruturação da cutícula, agravando o dano ao tecido. Dessa forma, o dano foliar deve ser avaliado utilizando também por outras vias além daquelas avaliadas no presente estudo.

No campo, o Ni pode ser inserido no manejo da adubação foliar com ureia, utilizando 5,0 kg ha^{-1} de N, em substitição de 25 % da dose de N via solo. A combinação com 25 g ha^{-1} de Ni via foliar tem efeito positivo sobre o metabolismo e potencilamente sobre produtividade de açúcar. O manejo proposto precisa ser reavaliado em ciclos sucessivos para validação das teorias e resultados aqui apresentados.

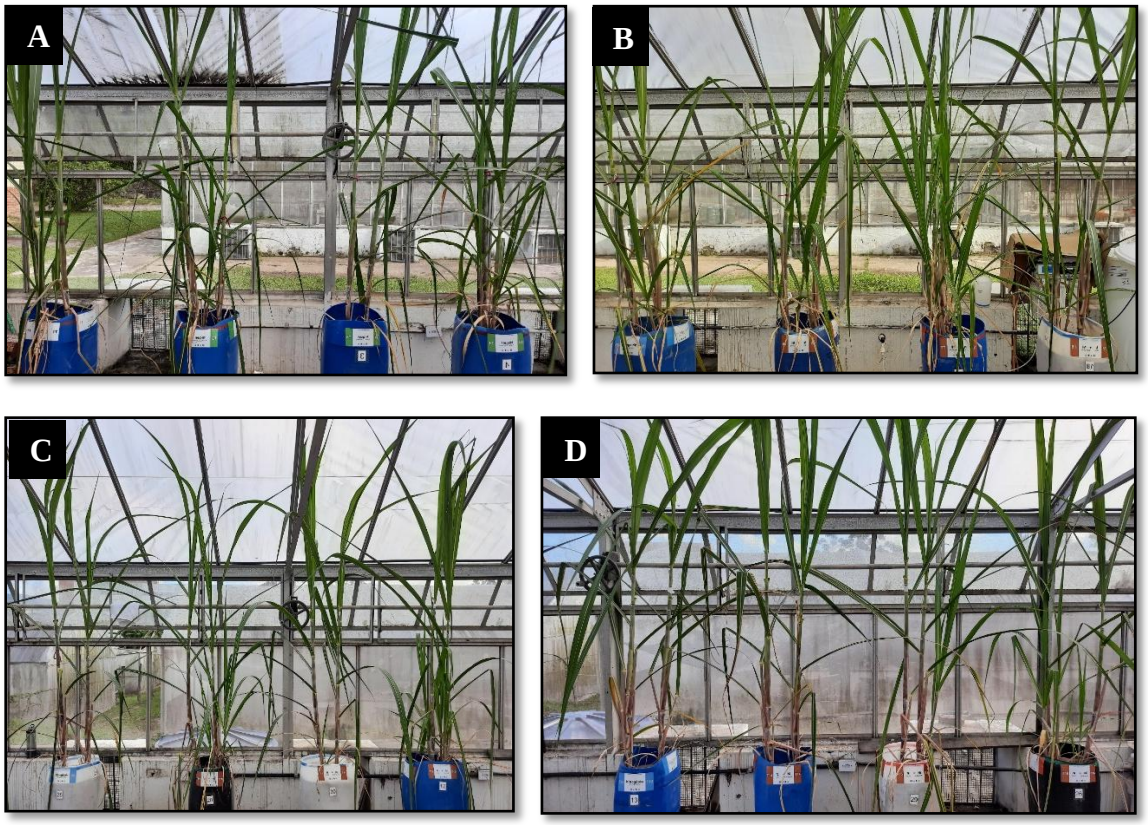
A época de aplicação e o percentual de substituição são os principais pontos a serem elucidados para aplicabilidade do manejo, priorizando a pulverização entre 90 e 140 dias. A avaliação do ciclo do nitrogênio deve ser complementada com as atividades das enzimas GS, GOGAT, GDH, e teor de nitrato. Tal estudo será importante para enriquecer o entendimento da nutrição e fisiologia de N-ureia e Ni em cana-de-açúcar, sobretudo em condições de campo.

O manejo combinado de ureia+Ni deve utilizar doses baixas de ureia e Ni via foliar, que apresentaram melhor desempenho no estímulo ao metabolismo, sem risco de distúrbios bioquímicos e morfológicos. No entanto, o manejo de doses altas de ureia via foliar, que ainda pode ser uma testado como alternativa de aumento da disponibilidade de N para a cana-de-açúcar, deve ser avaliado com uso de inibidores de urease, avaliando o tempo de disponibilização do N para ser utilizado, e a redução da perda de N por volatilização ainda na superfície foliar. Dose alta de N pode ser combinada com dose alta de Ni (50 g ha^{-1} de Ni), com potencial de aumento estímulo à produção. Essa ferramenta de fertilizante especial pode tornar

o manejo foliar ainda mais sustentável, aumentando a eficiência produtiva das plantas de cana-de-açúcar de alto desempenho.

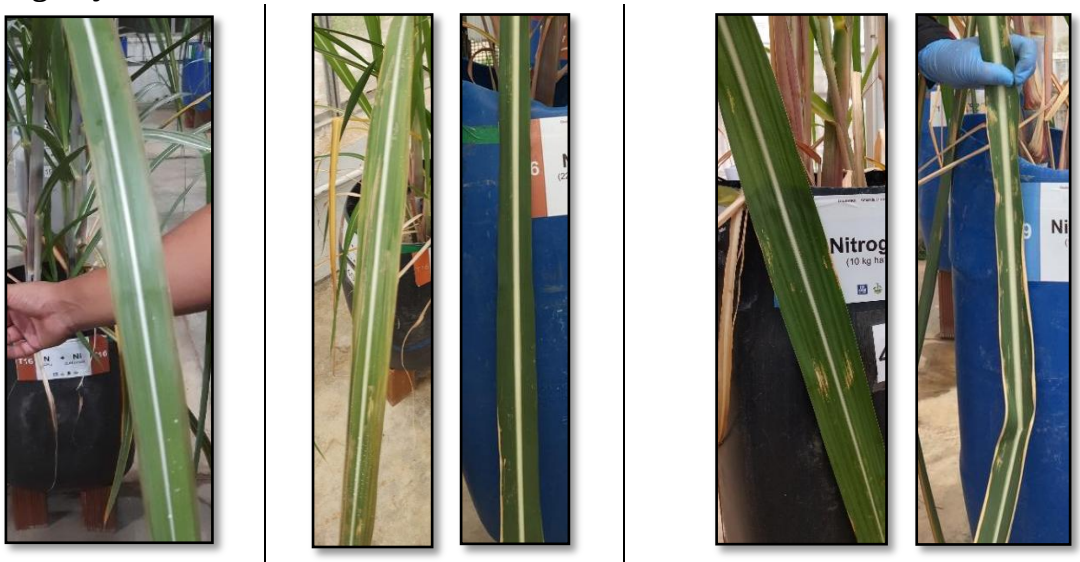
É importante destacar a combinação do manejo foliar com ferramentas de tecnologia de aplicação, considerando os parâmetros ambientais e de qualidade da calda para garantir a eficiência da absorção. As fontes fertilizantes disponíveis devem ser avaliadas quanto à modificação das propriedades da calda, como evidenciado no presente estudo quanto ao pH. Também devem ser avaliadas quanto à eficiência de absorção, utilizando técnicas mais atualizadas sobre a velocidade de absorção e formas de interação com outros elementos da calda. No presente estudo, foram utilizados sais de reagente p.a., que diferem de fertilizantes comerciais quanto à formulação, principalmente os fertilizantes foliares.

APÊNDICE A – Padrão de desenvolvimento das plantas aos 7 dias após a pulverização foliar de Ni e ureia. Experimento conduzido em casa de vegetação.



A) Controle seguido das doses crescentes de Ni. B) Dose 1 de ureia seguida da combinação com doses crescentes de Ni. C) Dose 2 de ureia seguida da combinação com doses crescentes de Ni. D) Dose 3 de ureia seguida da combinação com doses crescentes de Ni.

APÊNDICE B – Avaliação visual dos danos foliares nas primeiras 24 horas APF, em casa de vegetação



24 h AAF | 7 dias AAF | 7 dias AAF

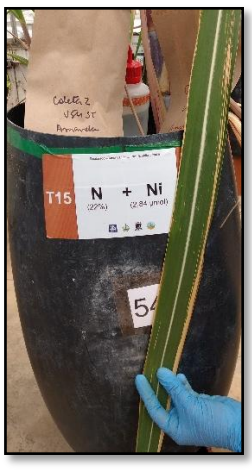
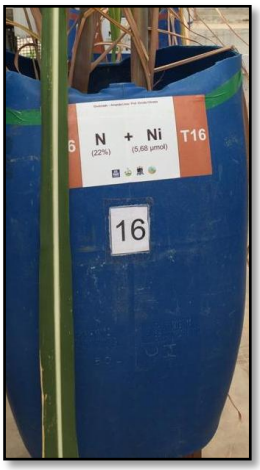
T16 (14 % de ureia + 1,7 mM de Ni) | **T9** (14 % ureia)

1. Modificação da coloração da margem da folha pulverizada após 24 h AAF e variação na intensidade de dano entre parcelas com o mesmo tratamento, evidenciando o baixo desempenho do adjuvante utilizado. Também pode ser visualizado o estágio final do dano causado pelo acúmulo de ureia na borda da folha (T9).

T2 (0,85 mM de Ni) | **T3** (1,70 mM de Ni) | **T4** (3,41 mM de Ni)

2. Doses crescentes de Ni aos sete dias AAF. Destaque para danos necróticos com aplicação da maior dose de Ni (T4).

APÊNDICE C – Avaliação visual aos 7 dias após a pulverização foliar, em casa de vegetação

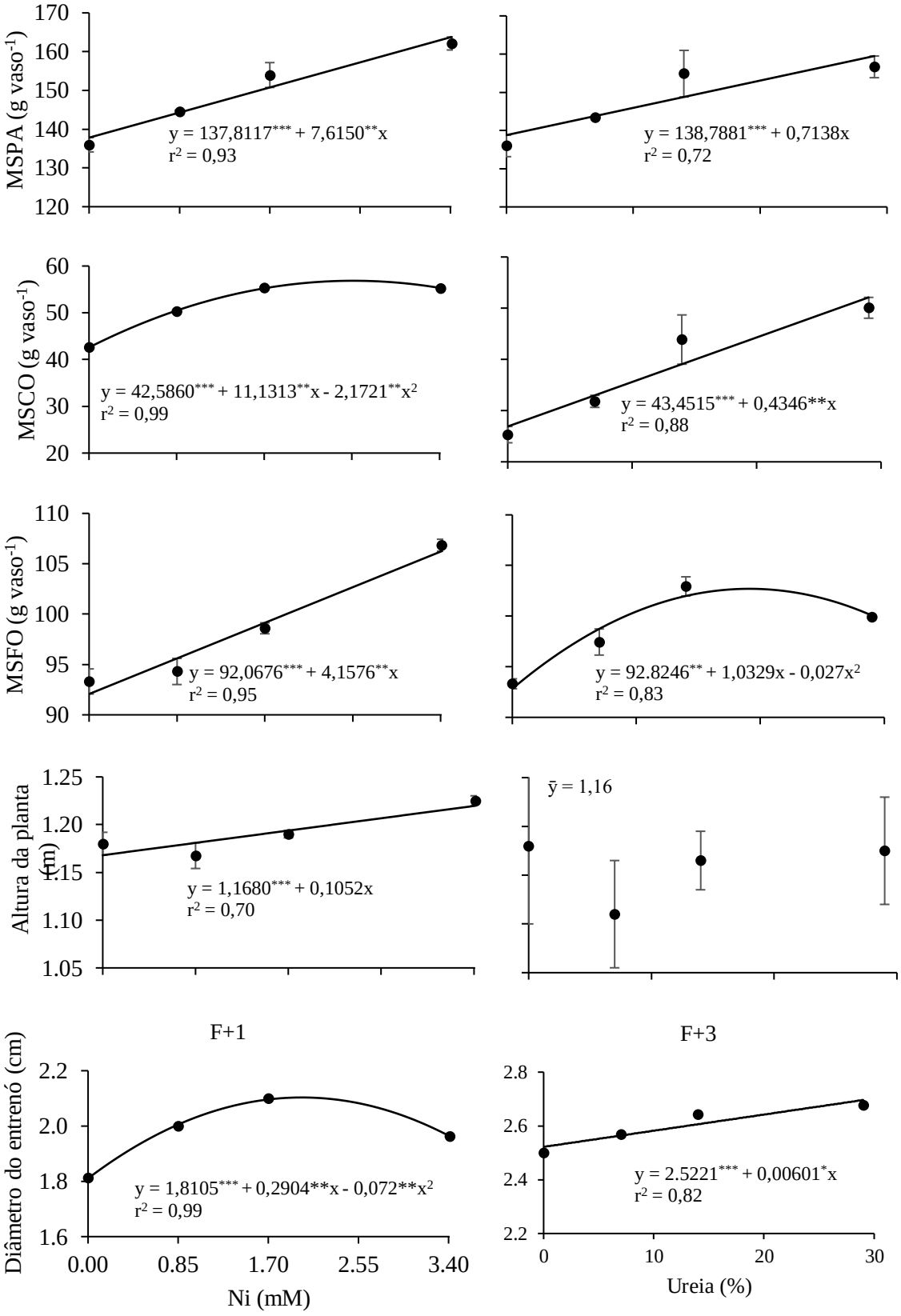
7% de ureia	+ 0,85 mM de Ni	+ 1,70 mM de Ni	+ 3,41 mM de Ni
14% de ureia	+ 0,85 mM de Ni	+ 1,70 mM de Ni	+ 3,41 mM de Ni
			
29% de ureia	+ 0,85 mM de Ni	+ 1,70 mM de Ni	+ 3,41 mM de Ni

1. Quadro comparativo da avaliação visual da interação das doses de Ni e ureia.

2. Dano foliar em folhas que receberam ureia nas doses 14 % e 29 %, independente da adição de Ni, com calda de pulverização sem ajuste de pH.

3. Folhas pulverizadas com 7 % e 14 % aos 50 dias APF, independente da adição de Ni. Caldas com pH ajustado para 6,3.

APÊNDICE D – Modelos de comportamento dos dados biométricos aos 7 dias após a pulverização foliar com Ni e ureia. Estudo conduzido em casa de vegetação.



APÊNDICE E – Registros das plantas antes da colheita em campo.

A) Porção apical das plantas. C) Colmos afetados por doença: perda do ponteiro e murchamento dos entrenós apicais.