

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

JOYSE MATOS DE JESUS

**Metabolismo do nitrogênio na cana-de-açúcar com aplicação foliar de N, Ni
e Mo**

RECIFE

2023

Joyse Matos de Jesus
Bacharela em Engenharia Agrônômica

**Metabolismo do nitrogênio na cana-de-açúcar com aplicação foliar de
N, Ni e Mo**

Dissertação 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 Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Emídio Cantídio Almeida de Oliveira.

Coorientador: Tiago Barreto Garcez.

**Recife
2023**

JOYSE MATOS DE JESUS

Metabolismo do nitrogênio na cana-de-açúcar com aplicação de N Ni e Mo

Dissertação 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 Mestre em Ciência do Solo.

Aprovada em 09 de março de 2023

Prof. Dr. Emídio Cantídio Almeida de Oliveira
Orientador
Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Mário de Andrade Lira Júnior
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Tiago Barreto Garcez
Universidade Federal de Sergipe

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

G58m JESUS, JOYSE MATOS DE
Metabolismo do nitrogênio em cana-de-açúcar com aplicação foliar de N, Ni e Mo. / JOYSE MATOS DE JESUS. -
2023.
52 f. : il.

Orientador: Emidio Cantídio Almeida de Oliveira.
Coorientador: Tiago Barreto Garcez.
Inclui referências, apêndice(s) e anexo(s).

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, 2023.

1. redutase do nitrato. 2. urease. 3. assimilação de nitrogênio. I. Oliveira, Emidio Cantídio Almeida de, orient. II. Garcez, Tiago Barreto, coorient. III. Título

CDD 631.4

AGRADECIMENTOS

À Deus por permitir que eu chegasse até aqui.

Aos meus pais, José e Marizete, pelo apoio e incentivo em todas as etapas da minha vida.

Ao meu irmão Lucas e minhas sobrinhas Luany e Lorena, pelos momentos de descontração e renovação, que foram essenciais para que eu permanecesse na caminhada.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela concessão da bolsa de mestrado.

A UBYFOL pelo apoio financeiro para a realização da pesquisa.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em especial aos Professores Giselle, Betânia e Valdomiro, por permitirem o acesso aos laboratórios para que fosse possível a realização das análises.

A Professora Giselle, pelas palavras de incentivo, por acreditar em mim e por me ouvir nos momentos de aflição.

Aos colegas do laboratório de química do solo, Adão, Paulo e Pedro pelas conversas e pela assistência na rotina laboratorial.

Ao professor Tiago Garcez, pela paciência e disponibilidade em sanar as minhas dúvidas e por ter despertado em mim o amor pela ciência do solo.

Aos membros da banca, Prof. Mário Lira e Tiago Garcez, por aceitarem o convite para contribuir na melhoria desse trabalho.

Ao meu orientador, Professor Emídio Oliveira, pela confiança, pela paciência e pela orientação nos momentos decisivos.

A todos os membros do Grupo de Pesquisa em Nutrição Adubação e fertilidade do Solo – GNAF, pelas contribuições na condução do experimento e realização das análises. Em especial a Joel, Crissogno, Ana Karolina e Pedro.

A Lilian, mais que uma aluna de iniciação científica, minha parceira de pesquisa. Sem sua ajuda tudo seria mais difícil.

A minha amiga Taila por sonhar junto comigo e estar sempre ao meu lado nos momentos difíceis.

A Conceição e Keyla por todas as conversas e palavras de motivação diariamente.

A todos, muito obrigada!

Metabolismo do nitrogênio e crescimento de cana-de-açúcar com aplicação foliar de N, Ni e Mo.

RESUMO

A adubação foliar é uma alternativa complementar a adubação via solo, pois permite o fornecimento de nutrientes no período de máxima demanda pela cultura e evita a exposição aos processos de perda de nutrientes que ocorrem no solo. O nitrogênio é um dos nutrientes mais requeridos pela cana-de-açúcar e pode ser absorvido pelas folhas nas formas nítrica (NO_3^-), amídica (NH_2) e amoniacal (NH_4^+). Os micronutrientes níquel (Ni) e molibdênio (Mo) podem viabilizar o aumento da assimilação do N fornecido via foliar através da ativação das enzimas urease (UR) e nitrato redutase (NR), respectivamente. Ambos promovem o aumento da assimilação de N e conversão em biomassa das culturas. O objetivo do estudo foi avaliar o efeito da adubação foliar com diferentes formas de N, combinadas com Ni e Mo, em potencializar o metabolismo foliar de N e o crescimento da cana-de-açúcar. O experimento foi realizado em cana planta com a variedade RB867515 cultivada em lisímetros por um período de 202 dias. Utilizou-se o delineamento experimental em blocos casualizados, com 8 tratamentos e 3 repetições, totalizando 24 parcelas experimentais. Os tratamentos consistiram na aplicação foliar de Ni, Mo e N (13,9 % - NO_3^- , 6,6% - NH_4^+ e 22,5% - NH_2), sendo aplicado o equivalente a 2 kg ha^{-1} de N, 6 g ha^{-1} de Ni, 50 g ha^{-1} de Mo, nas combinações N + Ni, N + Mo e N + Ni + Mo e o tratamento controle (água+dispersante). As soluções foram pulverizadas manualmente nas folhas F+1, F+2 e F+3, no estágio de máximo crescimento vegetativo da cultura, aos 158 dias após o plantio (DAP). No terceiro e décimo primeiro dias após a pulverização (DAPF), o terço médio das folhas que receberam a solução foi coletado para avaliação da atividade das enzimas do metabolismo do nitrogênio UR e RN, bem como foi determinado os teores de N total, NH_4^+ , NO_3^- , Ni e Mo. No final do ciclo de avaliação foi mensurado os parâmetros biométricos: altura da planta (da base até a inserção da folha +1), diâmetro médio do colmo e biomassa seca da planta. O comprimento e o diâmetro do entrenó das folhas que receberam a aplicação também foi mensurado. Os dados normais e homocedásticos foram submetidos à análise de variância ($p < 0,05$) e as médias comparadas pelo teste de scott-knott. ($p < 0,05$). A atividade da RN aumentou com a aplicação de N na folha após 11 dias. O teor de Mo nas folhas aumentou aos três DAPF quando a solução continha esse nutriente, o que demonstra haver absorção de Mo em curto período, porém sem efeito no metabolismo do N. A aplicação foliar de N, Mo e Ni não mostrou melhoria no estado nutricional de N da cana-de-açúcar, uma vez que não houve diferença nos teores NO_3^- , NH_4^+ e N total nas folhas e na planta com aplicação das soluções, mantendo os teores sempre abaixo dos valores considerados adequados. A baixa resposta no metabolismo e sem efeitos na nutrição não promoveram ganhos no crescimento e na produção de biomassa seca da planta.

Palavras-chave: Redutase do nitrato. Urease. Assimilação de nitrogênio.

Nitrogen metabolism and growth of sugarcane with foliar application of N, Ni and Mo.

ABSTRACT

Foliar fertilization is a complementary alternative to soil fertilization, as it allows the supply of nutrients in the period of maximum demand for the crop and avoids exposure to nutrient loss processes that occur in the soil. Nitrogen is one of the nutrients most required by sugarcane and can be absorbed by leaves in nitric (NO_3^-), amidic (NH_2) and ammoniacal (NH_4^+) forms. The micronutrients nickel (Ni) and molybdenum (Mo) can facilitate the increase in the assimilation of N supplied via the leaves through the activation of the enzymes urease (UR) and nitrate reductase (NR), respectively. Both promote increased N assimilation and conversion into crop biomass. The objective of the study was to evaluate the effect of foliar fertilization with different forms of N, combined with Ni and Mo, in enhancing foliar N metabolism and sugarcane growth. The experiment was carried out in cane plants with the RB867515 variety cultivated in lysimeters for a period of 202 days. The experimental design was randomized blocks, with 8 treatments and 3 replications, totaling 24 experimental plots. The treatments consisted of foliar application of Ni, Mo and N (NO_3^- , NH_4^+ and NH_2), with the equivalent of 2 kg ha⁻¹ of N, 6 g ha⁻¹ of Ni, 50 g ha⁻¹ of Mo, in the combinations N + Ni, N + Mo and N + Ni + Mo and the control treatment (water + dispersant). The solutions were manually sprayed on the F+1, F+2 and F+3 leaves, at the stage of maximum vegetative growth of the crop, at 105 days after planting (DAP). On the third and eleventh days after spraying (DAPF), the middle third of the leaves that received the solution was collected for evaluation of the activity of the nitrogen metabolism enzymes UR and RN, as well as the determination of the levels of total N, NH_4^+ , NO_3^- , Ni and Mo. At the end of the evaluation cycle, the biometric parameters were measured: plant height (from the base to the insertion of the leaf +1), average stem diameter and plant dry biomass. The length and the internode diameter of the leaves that received the application were also measured. The data obtained were subjected to the Shapiro-Wilk normality test ($p < 0.05$) and homogeneity of variances by the Levene test ($p < 0.05$) and transformed when necessary. Normal and homoscedastic data were submitted to analysis of variance ($p < 0.05$) and means compared using the Scott-knott test. ($p < 0.05$). In the metabolism of N, only the RN showed a difference and it increased with the application of N on the leaf after 11 days. The Mo content in the leaves increased at three DAA when the solution contained this nutrient, which demonstrates that Mo is absorbed in a short period, but without effect on N metabolism. nutritional content of N from sugarcane, since there was no difference in the NO_3^- , NH_4^+ and total N contents in the leaves and in the plant after applying the solutions, keeping the contents always below the values considered adequate. The low response in metabolism and no effects on nutrition did not promote gains in plant growth and dry biomass production.

Keywords: Nitrate reductase. Urease. Nitrogen assimilation

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – Precipitação pluvial do período de realização do experimento.....14
- Figura 2** – Contraste ortogonal dos tratamentos foliares sobre a atividade da enzima nitrato redutase (ARN) na folha +1 da variedade de cana-de-açúcar RB867515, 3 dias após a aplicação foliar (DAP) (A;B) e 11 dias após a aplicação foliar (C;D)41
- Figura 3** – Contraste ortogonal dos tratamentos foliares sobre a atividade da enzima urease (UR) na folha +1 da variedade de cana-de-açúcar RB867515, 3 dias após a aplicação foliar (DAP) (A;B) e 11 dias após a aplicação foliar (C;D).....43
- Figura 4** – Contraste ortogonal dos tratamentos foliares sobre a teor de nitrato (NO_3^-) na folha +1 da variedade de cana-de-açúcar RB867515, 3 dias após a aplicação foliar (DAP) (A;B) e 11 dias após a aplicação foliar (C;D).....45
- Figura 5** – Contraste ortogonal dos tratamentos foliares sobre o teor de amônio (NH_4^+) na folha +1 da variedade de cana-de-açúcar RB867515, 3 dias após a aplicação foliar (DAP) (A;B) e 11 dias após a aplicação foliar (C;D).....47
- Figura 6.** Teor de níquel (A;C) e molibdênio (B;D) na folha +1 da variedade RB8675 aos 3 e o 11 DAPF, respectivamente.....50
- Figura 7.** Nitrogênio total da folha +1 (NTFA) (A) e da planta toda (NPT) (B) da variedade de cana-de-açúcar RB867515 aos 202 dias após o plantio.....51
- Figura 8.** Contraste ortogonal dos tratamentos foliares sobre o teor de N na folha que recebeu aplicação foliar (teor de N na folha F1) (A;B) e teor de N da planta (teor de N) (C;D), da variedade RB867515, aos 202 dias do ciclo de cultivo.....53
- Figura 9** – Figura 6. Altura dos entrenós correspondentes as folhas +1, +2 e +3, da variedade de cana-de-açúcar RB867515, aos 202 após o plantio.....55
- Figura 10** – Diâmetro dos entrenós correspondentes as folhas +1, +2 e +3, da variedade de cana-de-açúcar RB867515, aos 202 após o plantio.....56

Figura 11 – Altura média das planta (A), diâmetro médio do colmo (B), biomassa do colmo (C) e biomassa total (D), da variedade de cana-de-açúcar RB867515, aos 202 dias após o plantio.....57

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Hipótese.....	11
1.2 Objetivos.....	11
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i>	11
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 Importância econômica da cana-de-açúcar.....	12
2.2 Adubação nitrogenada na cana-de-açúcar.....	12
2.2 Adubação foliar nitrogenada.....	13
2.3 Níquel e Molibdênio na adubação foliar.....	15
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	17
3.1 Local de realização do experimento e arranjo experimental.....	17
3.2 Condução experimental.....	18
3.5 Aplicação foliar.....	19
3.6 Coleta de folhas.....	20
3.7 Análises enzimática e nutricional.....	20
3.8 Análises biométricas e biomassa.....	21
3.9 Análise estatística.....	21
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
6 CONCLUSÕES.....	42
7 AGRADECIMENTOS.....	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43
APÊNDICE A – Área experimental.....	48
APÊNDICE B – Lísímetros utilizados na condução do experimento.....	49

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é a uma das principais culturas bioenergéticas com potencial para a produção de biocombustíveis. Isso é atribuído ao seu metabolismo fotossintético C4, que permite o uso eficiente de água e nutrientes para conversão em fotoassimilados e biomassa.

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e a região Sudeste é responsável pela maior produtividade. O Nordeste contribui com 8,6% do total que é produzido.

Entre os fatores que influenciam a produtividade da cana-de-açúcar está o manejo nutricional dos canaviais. O nitrogênio é o segundo nutriente mineral mais limitante pela cultura, a eficiência da adubação nitrogenada via solo, é considerada baixa. Isso se deve a presença de condições edafoclimáticas favoráveis as perdas, nas regiões produtoras de cana-de-açúcar.

No Nordeste a maioria dos solos cultivados com cana-de-açúcar são de textura média a arenosa e isso favorece os processos de perdas de nitrogênio por lixiviação no período das chuvas. Por isso, existe a necessidade pela busca de manejos que possibilitem a diminuição de perdas e otimizem o uso do nutriente pelas plantas.

A adubação foliar é uma técnica utilizada para suprir deficiências nutricionais nos estágios de máximo desenvolvimento vegetativo dos canaviais. Isso se deve ao porte das plantas nesse estágio de desenvolvimento, que dificulta a entrada de maquinário para a adubação via solo. Além disso, o suprimento de micronutrientes são realizados na adubação foliar por possibilitar a administração de doses mais baixas de nutrientes.

O níquel e o molibdênio são micronutrientes que participam do processo de assimilação de nitrogênio pelas plantas. O níquel é cofator da enzima urease, que é responsável pela hidrólise da ureia no tecido foliar. Após a absorção da ureia pelas folhas ou a própria ureia endógena, a enzima urease realiza a hidrólise da ureia e converte em amônio e dióxido de carbono. Enquanto o molibdênio é cofator da enzima redutase do nitrato que reduz o nitrato a nitrito e o nitrito é reduzido a amônio pela enzima nitrito redutase. O amônio sintetizado pelas duas vias é metabolizado pela enzima glutamina sintetase, que utiliza amônio e glutamina para a conversão em glutamato para posterior conversão em aminoácidos.

O nitrogênio pode ser absorvido pelas plantas nas formas nítrica, amídica e amoniacal entre essas formas de nitrogênio a forma amídica é a mais utilizada na adubação foliar. Além de ser a fonte que possui alta concentração de nitrogênio, a ureia é a fonte mais viável economicamente e é absorvida mais rápido pelas folhas quando comparado as outras formas de nitrogênio. No entanto, o uso da ureia combinado a outras formas de nitrogênio e outros

nutrientes, pode facilitar a absorção foliar. A ureia é um composto não iônico, solúvel em água, que consegue atravessar mais facilmente as vias de absorção foliar.

Diante da importância da adubação nitrogenada na cana-de-açúcar e a necessidade de otimizar o uso do nutriente pela cultura. O objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito da adubação foliar com diferentes formas de N, combinadas ao Ni e Mo, em potencializar o metabolismo foliar de N e o crescimento da cana-de-açúcar.

1.1 Hipótese

A atividade das enzimas (nitrato redutase e urease) são maiores quando adubação foliar nitrogenada é combinada com Níquel e Molibidênio;

A maior assimilação de N com adubação foliar nitrogenada combinada com níquel e molibidênio favorece o crescimento e produção de biomassa da cana-de-açúcar.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o efeito da adubação nitrogenada foliar em potencializar assimilação de N e o crescimento da cana-de-açúcar quando combinadas com Ni e Mo.

1.2.2 Objetivos Específicos

Avaliar o efeito da aplicação foliar de nitrogenada combinada com molibidênio e níquel na atividade da enzima redutase do nitrato e urease;

Avaliar as mudanças dos teores de nitrato, amônio, nitrogênio total em folhas tratadas com N (NO_3^- , NH_4^+ e NH_2), Ni e Mo.

Avaliar os efeitos da aplicação foliar de N, Ni e Mo sob o crescimento e produção de biomassa da cana-de-açúcar.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Importância econômica da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar pertence a família Poaceae (*Saccharum* spp.), caracterizada por apresentar caule do tipo colmo, composto de nós, entrenós e gemas, que após a brotação é capaz de emitir perfilhos durante o seu desenvolvimento vegetativo (JADOSKI et al. 2010). Apresenta metabolismo fotossintético C4, que confere eficiência na captação de CO₂ e conversão em biomassa e subprodutos (LEAL; WALTER; SEABRA, 2013., SILVA, 2017). A cana-de-açúcar é uma planta semiperene, originária das regiões tropicais da Ásia, principalmente da Índia, conhecida mundialmente por sua alta produtividade e como matéria-prima de alta qualidade para a produção de açúcar, principalmente sacarose, glicose e frutose (SANTOS et al., 2020).

O elevado rendimento para a produção de etanol, associado a maior eficiência no uso de água e nutrientes, em relação à outras culturas sucroenergéticas, como beterraba, milho, sorgo e trigo, faz a cana-de-açúcar ser a principal cultura energética para a produção de biocombustíveis (LEAL; WALTER; SEABRA, 2013; SHIVALINGAMURTHY et al, 2018).

O Brasil lidera a produção mundial de cana-de-açúcar com produção de 628,4 milhões de toneladas (FAO, 2017). As regiões Sudeste e Centro-oeste são responsáveis pela maior parte da produção nacional, somando cerca de 537 milhões de toneladas. A região Nordeste contribui com 53,9 milhões de toneladas. Pernambuco (14,2 milhões de toneladas) e Alagoas (18 milhões de toneladas) se destacam como maiores estados produtores da região (IBGE, 2022).

O processamento da cana-de-açúcar permite a refinaria a exploração de três principais produtos, o açúcar, etanol e bioeletricidade, bem como uma diversidade de subprodutos. O setor representa 6,73% da energia outorgada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), sendo a quarta fonte de energia mais importante do país em 2019 (ÚNICA, 2019).

Além disso, o setor sucroenergético possui impacto no setor social por contribuir para a geração de inúmeros empregos.

2.2 Adubação nitrogenada na cana-de-açúcar

O nitrogênio é o segundo nutriente mais requerido pela cana-de-açúcar (WOOD, 1990). O N é componente estrutural da clorofila, aminoácidos e ácidos nucleicos e pode ser absorvido pelas plantas nas formas nítrica (NO₃⁻), amídica (NH₃) e amoniacal (NH₄⁺). O nitrato é a forma mais abundante na maioria dos solos agrícolas, inclusive nos solos arenosos, onde as condições

de aeração e correção da acidez favorecem o processo de nitrificação realizado pelos microrganismos nitrificantes (ROBINSON et al., 2011).

Na cana-de-açúcar, a contribuição da fixação biológica de nitrogênio (FBN) realizada por microrganismos diazotróficos e a mineralização da matéria orgânica para a nutrição nitrogenada é variável e pode ocasionar limitações ao perfilhamento, crescimento e desenvolvimento das plantas (ZHU et al., 2015; ZHANG et al., 2018; ANTUNES et al., 2019; PEREIRA et al., 2021). Dessa forma, a adição de fertilizante nitrogenado é a forma de garantir a produtividade adequada dos canaviais, principalmente em solos com baixa disponibilidade de matéria orgânica (ZHAO et al., 2014; MARIANO et al., 2017; ZHANG et al., 2018).

Os fertilizantes nitrogenados podem ser constituídos das formas nítricas, amídica e amoniacal. De acordo com a fonte utilizada e as condições edafoclimáticas e de manejo, podem ocorrer diferentes intensidades de perdas decorrentes da dinâmica do N no solo (ZHENG et al., 2019; WANG et al., 2019). Em média, as perdas do N-fertilizante nos canaviais brasileiros pelos processos de volatilização, desnitrificação e lixiviação são de 19%, 1,8% e 5,6%, respectivamente (OTTO et al., 2016). Por esse motivo o nitrogênio derivado do fertilizante que é extraído pela cana-de-açúcar é estimado em torno de 40% (FRANCO et al., 2011) e a recuperação do N derivado do fertilizante é inferior a 20% (OTTO et al., 2016).

No Nordeste, os solos das principais regiões produtoras são arenosos, favorecendo as perdas por lixiviação nos períodos de alto índice pluviométrico (GHILBERTO; LIBARDI; TRIVELIN et al., 2015; LU et al., 2019; OTTO et al., 2016; SILVA, 2019). Estratégias utilizadas para compensar as perdas, como a adubação com doses maiores de fertilizante ao solo e o parcelamento de doses não se mostraram eficientes em reduzir as perdas e aumentar a recuperação de N-fertilizante pelas plantas (CHEN et al., 2019; ZHAO; LI; JAING, 2019; SILVA, 2019).

A adubação nitrogenada via solo combinada com micronutrientes que participam do metabolismo do nitrogênio na planta (SANTOS et al., 2019) bem como a combinação com a adubação foliar tem mostrado resultados (ANDRADE, 2021). Essas técnicas melhoram o estado nutricional da cultura e possibilitam a redução das doses de fertilizante nitrogenado (MELLIS et al., 2016; SANTOS et al., 2018; ANDRADE, 2021), o que contribui para o aumento do balanço energético da cana-de-açúcar (TRIVELIN et al., 2002; OTTO et al., 2016; BORDONAL et al., 2018).

2.2 Adubação foliar nitrogenada

A adubação foliar consiste na pulverização de nutrientes na superfície da folha. Esta técnica é ferramenta importante para o manejo sustentável e produtivo das lavouras, por melhorar o estado nutricional de culturas (NIU et al., 2020). No caso da adubação foliar com N, é uma alternativa frente à baixa eficiência da adubação via solo (ANDRADE, 2021).

A eficiência da adubação foliar está diretamente relacionada as propriedades das folhas, que são revestidas por uma camada extracelular composta por cutina e/ou cutano. Esta camada geralmente é rica em lipídios, ceras e polissacarídeos e compostos fenólicos. Além da cutícula, existem os tricomas e estômatos que podem influenciar na absorção foliar de nutrientes (TREDENICK et al., 2017; FERNÁNDEZ; GIL-PELEGRÍN; EICHERT, 2020).

A Capacidade dos solutos (fertilizantes) penetrar na folha e ficar disponível nos sítios metabólicos depende das características físico-químicas da solução nutritiva como pH, peso molecular ou concentração de ingredientes ativos e adjuvantes, bem como da interação da gota com a folha (FERNÁNDEZ e EICHERT, 2013; BUENO et al., 2019). O contato da folha com a gota forma um ângulo de contato. Quanto maior a área de contato entre as gotas de fertilizante e a superfície da planta, maior será a chance de ocorrer absorção pela cutícula ou por poros estomáticos (TREDENICK et al., 2017; FERNÁNDEZ; GIL-PELEGRÍN; EICHERT, 2020). Além disso, o uso de surfactantes e acidificantes, são necessários para aumentar a permeabilidade da cutícula e aceleram a absorção da solução e reduzir o risco de danos pelo acúmulo de sais na superfície da folha (FERNÁNDES; BROWN, 2013; PRADO, 2020).

No momento da adubação foliar com N, a solução fertilizante deve ser aplicada em tecidos jovens, que apresentam maior atividade metabólica devido a menor quantidade de cera, cutina e tricomas. Isso resulta em maior eficiência da técnica e maiores quantidades absorvidas pela folha (TRIVELIN, 2000; RUAN; GEREDÁS, 2015). A absorção de N pela folha pode ocorrer de forma passiva, sem gasto energético e de forma ativa, com gasto energético (TREDENICK et al., 2017; FERNÁNDEZ; GIL-PELEGRÍN; EICHERT, 2020).

Entre as fontes de N, a ureia apresenta absorção cuticular mais rápida do que as fontes amoniacal e nítrica (USCOLA et al., 2014). Trivelin et al. (1989) identificou que dentro de 48h a maior parte da ureia havia sido absorvida pela folha da cana-de-açúcar. A ureia é transportada por difusão na cutícula e é capaz de acelerar o transporte de outros íons. Assim, a combinação de ureia e outros nutrientes na solução foliar aumenta a eficiência da absorção e nutrição das culturas (LI; LIU, 2015; PRADO, 2020). Essa resposta associada ao baixo custo relativo do fertilizante faz com que a ureia seja a principal fonte de N utilizada na adubação foliar (SANGPLUNG; ROSARIO, 1978; DEUNER et al., 2008; CERQUEIRA et al., 2019; LEIE et al., 2020).

Na cana-de-açúcar, a fase de intenso crescimento vegetativo que coincide com a máxima demanda por N, a aplicação via solo é dificultada pelo manejo tradicional e a adubação foliar é uma ferramenta estratégica para aumentar a disponibilidade do nutriente (TRIVELIN; COLETI; LARA CABEZAS, 1984; TRIVELIN, 2000; GONZÁLEZ et al., 2018; CERQUEIRA et al., 2019).

2.3 Níquel e Molibdênio na adubação foliar

O níquel (Ni) é um elemento essencial para os vegetais, atuando na atividade de enzimas do metabolismo de nitrogênio e defesa vegetal (ESKEW et al., 1983; KOCHIAN, 1991; WELCH, 1995; HASINUR et al., 2005; FABIANO et al., 2015). Em condição de deficiência, os sintomas são expressos como clorose nas folhas mais jovens e necrose meristemática (BROWN et al., 1987; YOSSEF et al., 1998; BAI et al., 2006; WOOD et al., 2006). No metabolismo do N, o Ni atua como componente estrutural da enzima urease, no ciclo da ureia. A enzima é responsável pela hidrólise da ureia, que resulta na produção de amônia e dióxido de carbono. A amônia é protonada com um íon H^+ , e o íon amônio formado é assimilado pela glutamina sintetase (GS) no aminoácido glutamato (ESKEW et al., 1984; BROWN et al., 1987; SAKAMOTO E BRYANT.; 2001).

A importância do Ni no aumento da atividade da urease tem sido relatada em várias espécies como soja, feijão e cevada que foram cultivadas em baixa disponibilidade níquel, resultando no acúmulo de ureia no tecido foliar (ESKEW et al., 1983; BROWN et al., 1987). Em estudos mais recentes, a adição de Ni na solução de ureia foliar ou na solução nutritiva de plantas resulta em aumento da produção (ALIBAKHSHI; KHOSHGOFTARMANESH, 2015; BARCELOS et al., 2017; FREITAS et al., 2019). Em plantas de soja, a adição de Ni em solução foliar com alta concentração de ureia reduziu os danos foliares pelo acúmulo de ureia no tecido (KUTMAN; KUTMAN; ÇAKMAK, 2012), o que demonstra o potencial do micronutriente em aumentar a disponibilidade de N em plantas de alta demanda por N.

O Mo é requerido pela enzima nitrato redutase (NR), que atua na redução do nitrato do nitrato. O Mo é cofator da NR, reduzindo o nitrato a nitrito. Após essa etapa, o nitrito é reduzido à amônia, que é então assimilada pela GS (LI-PING et al., 2007). O uso do Mo tem estimulado a produção de cana-de-açúcar nos solos brasileiros (MELLIS et al., 2016; SANTOS et al., 2018), o que demonstra o potencial de resposta à adubação com esse nutriente.

Para a assimilação de nitrato, é necessário que o Mo esteja disponível em quantidades adequadas (NIE et al., 2016). Em experimento utilizando solução nutritiva, foi observado que

a atividade da NR foi elevada em cana-de-açúcar pelo aumento da concentração de Mo na solução (LI-PING et al., 2007).

Quando em baixa disponibilidade, o Mo pode reduzir a assimilação de nitrogênio e, através da redução da atividade RN, reduzindo a produção agrícola. A concentração de molibdênio na maioria dos solos é considerada baixa e sua disponibilidade é influenciada por propriedades químicas e mineralógicas (LÓPEZ et al., 2007).

Uma alternativa para aumentar a disponibilidade de Mo é a adubação foliar. A resposta de cultura como soja, feijão e girassol a adubação foliar com molibdênio já foi constatada (FABIANO; TIAGO, 2015). Entretanto em cana-de-açúcar ainda não foi estudado.

Diversos estudos avaliando a participação da adubação foliar de molibdênio em diferentes culturas, mostraram que o molibdênio tem efeito positivo na atividade da redutase do nitrato e redução das concentrações de nitrato e aumento das concentrações de amônio na planta. Em consonância, a atividade da enzima glutamina sintetase aumentou e os teores de nitrogênio total também foram elevados, sendo indicativo de aumento da assimilação de nitrogênio (STEINER e ZOZ, 2015; SKARPA; GHAFARIAN et al., 2013; KUNZOVÁ; ZUKALOVÁ, 2013).

Visto a importância do Ni e Mo no processo assimilatório de N pelas culturas e o potencial da adubação foliar em aumentar a disponibilidade de nutrientes na cultura da cana-de-açúcar. É importante o manejo desses nutrientes na adubação foliar com fontes de nitrogênio.

Na cana-de-açúcar a atividade da redutase do nitrato pode ser mais intensa nas folhas ou nas raízes (SANTOS et al., 2019). Na adubação foliar, a atividade da enzima na folha pode ser estimulada pelo aumento da disponibilidade de N-nitrato e de Mo, fornecidos pela solução de aplicação.

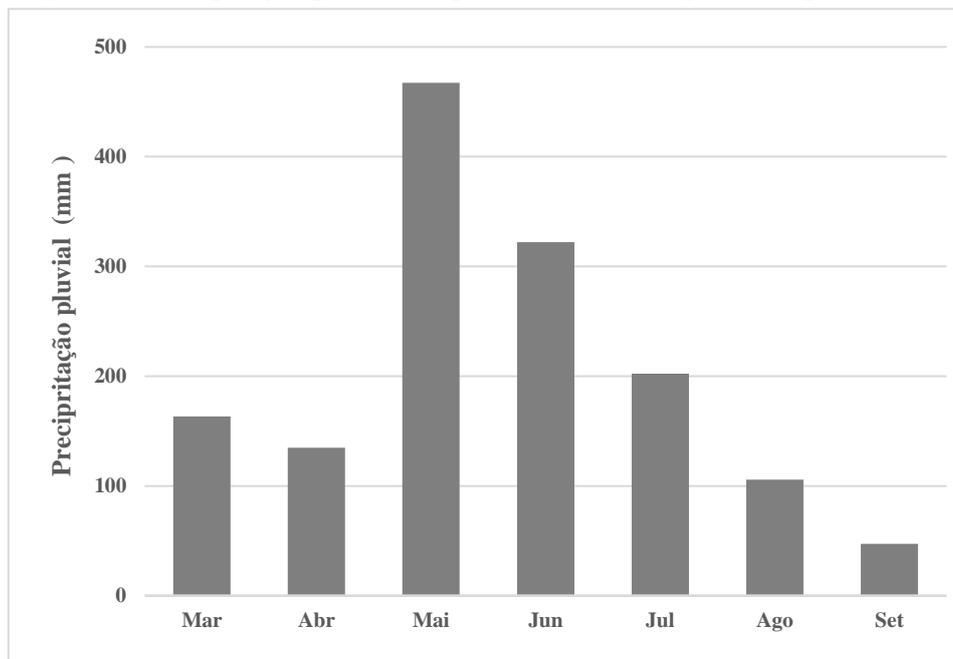
A combinação de Ni e Mo pode otimizar a nutrição da planta com nitrogênio, utilizando diferentes fontes de N. Como os micronutrientes interagem na presença de diferentes fontes de N, e como atuam sobre a atividade da urease e redutase do nitrato ainda é pouco compreendida (MORAES et al., 2009). O estudo da combinação de diferentes fontes de N, Ni e Mo pode elucidar os mecanismos que são estimulados pelos micronutrientes, e a seleção das outras fontes de N para adubação foliar.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local de realização do experimento e arranjo experimental

O experimento foi realizado em campo com plantas conduzidas em lisímetros de 0,5 m³, localizados no campo experimental do Departamento de Agronomia da Universidade Federal Rural de Pernambuco, no município de Recife (6°49'58,8'' S e 34°57'24''W), no período entre março e setembro de 2022. O clima é classificado como Am segundo a classificação climática de Koppen-Geiger. Caracterizado por apresentar temperatura média do mês mais frio sempre superior a 18°C apresentando uma estação seca de pequena duração (Figura 1).

Figura 1. Precipitação pluvial do período de realização do experimento



Utilizou-se o delineamento experimental em blocos casualizados, com 8 tratamentos e 3 repetições, totalizando 24 parcelas experimentais. Os tratamentos consistiram na aplicação foliar de Ni, Mo e N (NO_3^- , NH_4^+ e NH_2) isolados e combinados; N + Ni, N + Mo e N + Ni + Mo, sendo aplicado o equivalente a 2 kg ha⁻¹ de N, 6 g ha⁻¹ de Ni, 50 g ha⁻¹ de Mo, as. A fonte de nitrogênio continha as formas de N-ureia, N- NH_4^+ , e NO_3^- , nas proporções de 22,5%, 6,6% e 13,9%, respectivamente. Como fonte de níquel foi utilizado o sulfato de níquel e como fonte de molibdênio o molibdato de sódio.

3.2 Condução experimental

O experimento foi realizado no ciclo de cana planta, utilizando a variedade de cana-de-açúcar RB867515, pela representatividade nacional e regional, e por possuir adaptabilidade em condições de solo de fertilidade média (DAROS, 2015).

As plantas foram cultivadas em lisímetros de polietileno ($0,5 \text{ m}^3$) preenchidos com $0,49 \text{ m}^3$ de solo (Apêndice D). O solo foi coletado na camada de 0 a 60 cm de profundidade de um Espodossolo Humulúvico Órtico Dúrico, no Estado da Paraíba, historicamente cultivado com cana-de-açúcar. No ano anterior à instalação do experimento houve o cultivo de cana-de-açúcar por 9 meses.

Para o presente estudo, o solo foi caracterizado quanto aos atributos físicos sendo a D_s de $1,32 \text{ g dm}^{-3}$; D_p de $2,92 \text{ g dm}^{-3}$, porosidade total de 32,58%, macro porosidade de 26,51 % e a microporosidade de 5,06; pelo método do anel volumétrico. A granulometria foi de 970,60 g kg^{-1} de areia, 22, g kg^{-1} de silte e 1,20 g kg^{-1} de argila.; pelo método da pipeta com dispersante de hidróxido de sódio 1 mol L^{-1} (EMBRAPA, 2011).

Para os atributos químicos o solo foi caracterizado quando ao $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ com 5,7, na proporção de 1:2:5 (solo:solução). Ca^{2+} ($1,45 \text{ Cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), Mg^{2+} ($0,85 \text{ Cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), K^+ ($0,03 \text{ Cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e Na^+ ($0,02 \text{ Cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) foram extraídos por NH_4Cl ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$), sendo Ca^{2+} e Mg^{2+} determinados por absorção atômica e K e Na por fotometria de chamas (EMBRAPA, 2011). O P disponível de 5 mg dm^{-3} , foi extraído por Melhich-1 e dosado por colorimetria (EMBRAPA, 2011).

A acidez trocável (Al^{3+}) foi de $0,05 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, extraída por KCl ($1,0 \text{ mol L}^{-1}$) e determinado por volumetria (RAIJ et al., 2001). A acidez potencial ($\text{H}+\text{Al}$) foi $2,75 \text{ Cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, extraída por solução-tampão SMP e determinada por potenciometria. (EMBRAPA, 2011).

A MOS apresentou conteúdo de $11,16 \text{ mg dm}^{-3}$ foi oxidada em solução ácida de dicromato de potássio ($0,167 \text{ mol L}^{-1}$) com ácido sulfúrico (5 mol L^{-1}) e determinada por colorimetria. Os micronutrientes Zn ($1,90 \text{ mg dm}^{-3}$), Cu ($0,51 \text{ mg dm}^{-3}$), Mn ($2,10 \text{ mg dm}^{-3}$) e Fe (34 mg dm^{-3}) foram extraídos por solução de ETPA e determinados por absorção atômica. O B foi extraído por azometiona-H e determinado por colorimetria (RAIJ et al., 2001). Com os resultados obtidos foram estimadas a soma de bases ($2,35 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), a saturações por base (46%) e por alumínio (2%), assim como a CTC potencial ($5,15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$).

A amostragem do solo ocorreu nos 24 vasos, utilizando trado tipo holandês na camada de 0 – 0,2 m para coletar 01 amostras simples por vaso, para compor uma amostra composta.

O pH do solo foi corrigido 30 dias antes do plantio, utilizando $312,5 \text{ g vaso}^{-1}$ de calcário dolomítico. A dose foi determinada pelo método de elevação dos teores de $\text{Ca}+\text{Mg}$, tomando

como base 3 cmolc dm^{-3} como nível crítico de Ca+Mg para a cultura da cana-de-açúcar (CAVALCANTI et al., 2012).

No plantio foi utilizado uma densidade de 10 gemas m^{-1} . Para assegurar a qualidade dos rebolos, foi realizada triagem afim de evitar o plantio de sementes com danos visuais nas gemas, por ocasião de lesões mecânicas, pragas e doenças.

Na adubação de solo, foram aplicados equivalente a 60 kg ha^{-1} de N, 180 kg ha^{-1} de P_2O_5 , 150 kg ha^{-1} de K_2O , 5 kg ha^{-1} de Mn, 3 kg ha^{-1} de Zn, $0,1 \text{ kg ha}^{-1}$ de Cu e 1 kg ha^{-1} de B. Todas as doses foram selecionadas com base na dose de máxima eficiência física, capaz de proporcionar produtividade superior/igual 100 mg ha^{-1} . As doses de P, K, Mn, foram baseadas nos trabalhos de Simões-Neto et al. (2015), Rocha (2019), e Benett et al. (2011), respectivamente. As doses de Zn e B no foram baseadas no estudo de Marangoni et al. (2019). No plantio os nutrientes foram aplicados no fundo do sulco, fornecendo 30%, 100% e 30% da dose de N, P e K, respectivamente, e 50% da dose dos micronutrientes. A complementação das doses foi realizada aos 60 dias após o plantio (DAP). Após 90 do plantio, foi necessário realizar nova adubação contendo 30 kg ha^{-1} de N e 150 kg ha^{-1} de K_2O , devido, as plantas apresentaram sinais deficiência nutricional em virtude das fortes chuvas que atingiram o Estado de Pernambuco no mês de maio de 2022 (Figura 1). As fontes de nutrientes utilizadas foram o sulfato de amônio, fosfato monoamônico (MAP), cloreto de potássio. Os micronutrientes foram fornecidos com fontes à base de sulfato (Mn, Zn, Cu) e ácido bórico, usando os produtos comerciais *Cana Nordeste*© e *Boro MEA*©.

3.5 Aplicação foliar

A aplicação foliar foi iniciada às 5:30 horas e finalizada às 06:53 horas, aos 158 dias após o plantio, por apresentar fase de desenvolvimento vegetativo onde o dossel apresentava densidade de folhas necessária à aplicação foliar. A temperatura e umidade do ar foram monitoradas utilizando termo-higrômetro digital. No início da aplicação a temperatura foi de $21,3 \text{ }^\circ\text{C}$ e a umidade do ar de 89%, ao final da aplicação a temperatura era de $23,6^\circ\text{C}$ e a umidade 88%.

A pulverização das soluções foi realizada com auxílio de pulverizador manual, sobre a superfície adaxial e abaxial das folhas mais jovens totalmente expandidas, folha +1, +2 e +3 (sistema de ordemamento Kuijper), aplicando $10,4 \text{ mL}$ da solução por folha.

As soluções foliares foram preparadas mantendo um volume de calda de 50 L com concentrações de N, Ni e Mo, de 9,6%, 0,054% e 0,253%, respectivamente. As doses de N foram definidas com base na quantidade normalmente utilizadas na aplicações em áreas

comerciais de cana-de-açúcar; quanto ao Mo foi considerado a extração da planta com base no trabalho de Oliveira (2010); e a dose de Ni foi selecionada com base em experimento conduzido em trabalho do Grupo em Adubação, Nutrição e fertilidade do solo - GNAF, com cana-de-açúcar.

3.6 Coleta de folhas

As folhas +1 foram coletadas nos períodos de 3 e 11 DAPF. Após a coleta, as folhas foram lavadas com água deionizada, a fim de remover o resíduo de fertilizante na superfície foliar. O terço médio das folhas foram separados em três partes, eliminando a nervura central. Uma parte foi envolvida em papel alumínio e acondicionada em nitrogênio líquido, a segunda parte também envolta em papel alumínio foi acondicionada em caixa de isopor contendo gelo, e terceira parte acondicionada em saco de papel. Em seguida, as amostras acondicionadas em nitrogênio líquido foram armazenadas em *ultrafreezer* (-80°C), as amostras acondicionadas em saco de papel destinadas para secagem em estufa de circulação forçada de ar (65°C) e as amostras que foram acondicionadas na caixa de isopor com gelo foram imediatamente encaminhadas para a determinação da atividade da redutase do nitrato (*in vivo*).

3.7 Análises enzimática e nutricional

Atividade da enzima nitrato redutase (ARN) e urease (UR)

A atividade da redutase do nitrato foi analisada segundo Santos et al (2020), aos 3 e 11 DAPF. Foi utilizado 0,5 g de matéria fresca e acondicionada em recipiente de cor preto com tampa para evitar a passagem da luz. Foi adicionado aos potes contendo as amostras 2,5 mL da solução KNO_3 a 300 mmol L^{-1} , 2,5 mL de tampão fosfato a 285 mmol L^{-1} , 1 mL de Tween a 0,6 % (v/v), e 4 mL de água deionizada. Em seguida, os potes foram tampados completamente para evitar a passagem de luz e transferidos para uma estufa de circulação de ar a 32°C , permanecendo pelo tempo de incubação de 90 minutos.

Após o tempo de incubação, o extrato foi separado do tecido vegetal, retirada uma alíquota de 0,5 mL, e transferida para um copo descartável de 50 mL. A essa alíquota foram adicionadas 0,5 mL de solução de sulfanilamida (1%) em HCl 3 mol L^{-1} , 0,5 mL de dicloridrato de N-(1-naftil)-etilenodiamina (0,02%) e 4 mL de água deionizada. A mistura foi homogeneizada e o tempo de reação de 20 minutos foi cronometrado. Após o tempo de reação foi realizada a leitura das amostras em espectrofotômetro a 540 nm com a curva padrão.

Atividade da enzima urease

atividade da urease foi determinada segundo HOGAN et al., (1983) e McCULLOUGH (1967), aos 3 e 11 DAPF. As amostras armazenadas em ultrafreezer foram transferidas para uma caixa de isopor preenchida com nitrogênio líquido e gelo para evitar que as amostras permanecessem em temperatura ambiente e a atividade enzimática fosse acionada.

As amostras foram retiradas da caixa de isopor, uma por vez, e pesadas em balança analítica até atingir o peso de 0,2 g. Após a pesagem, as amostras foram transferidas para tubos falcon contendo 8 mL de tampão fosfato com ureia (pH 7,4). Em seguida, as amostras foram levadas a banho-maria em 30°C durante 3 horas. Foi retirada uma alíquota de 0,5 do extrato obtido e adicionado 2,5 mL de uma solução contendo 10 g de fenol 0,1 M e 50 mg de nitroprussiato de sódio; e 2,5 mL de outra solução composta por 5 g de NaOH 0,125 M, 53,7 g de NaHPO₄ 0,15M e 40 mL de NaOcl (3% Cl₂). A mistura foi homogeneizada e levada ao banho-maria a 37°C por 35 minutos. Após atingir a temperatura ambiente, foi realizada a leitura em espectrofotômetro a 625 nm de absorbância.

Análises nutricional

As amostras secas em estufa de circulação forçada de ar, foram processadas em moinho de facas e posteriormente em moinho de bolas até a obtenção de um pó fino. Em seguida foram determinadas as concentrações de N total, nitrato, amônio, Ni e Mo, aos 3 e 11 DAPF. Ao final do período de cultivo foi determinado o teor de N total na folha +1 e na planta toda e calculado o acúmulo de nitrogênio pela biomassa seca da planta (TEDESCO et al., 1995; TEIXEIRA, 2017).

3.8 Análises biométricas e biomassa

Ao avaliações biométricas foram realizadas aos 202 dias após o plantio (44 dias após a adubação foliar). Foi avaliado a altura da base até a folha +1 utilizando fita métrica, diâmetro médio do colmo utilizando paquímetro, e biomassa das plantas. Além disso foi avaliado a altura e diâmetro dos entrenós das folhas +1, +2 e +3. Para essas avaliações, foi realizada as aferições utilizando 2 plantas por parcela.

3.9 Análise estatística

Os dados foram analisados quanto aos critérios de normalidade e homocedasticidade, quando necessário foram transformados. Os dados normais e homocedásticos foram submetidos

a da análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Tukey (5%) e realizada a análise de contrastes ortogonais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As folhas começaram a apresentar sintomas de fitotoxidez após 24 horas da aplicação foliar. A evolução dos sintomas foi monitorada até 72 horas da aplicação, quando não foi observado evolução. Os tratamentos N, N Ni e N Mo apresentaram os sintomas de fitotoxidez mais severos (figura 2).

Figura 2. Fitotoxidade dos tratamentos após 42 horas da aplicação foliar

A fitotoxidez foi responsável por ocasionar perda da área fotossintética das plantas nas parcelas e menor atividade da enzima ARN nos tratamentos que apresentaram sinais mais severos (Tabela 2). Com exceção do tratamento N Mo, que apresentou ARN maior em comparação aos tratamentos que apresentaram fitotoxidade maior. Possivelmente isso aconteceu porque foi utilizado parte do terço médio menos afetado pela fitotoxidez, no momento da realização da análise.

Tabela 1. Atividade das enzimas redutase do nitrato (ARN), urease (UR), teor de nitrato (NO_3^-) e amônio (NH_4^+), na folha +1, 3 dias (3 DAP) e 11 dias (11 DAP) após a aplicação foliar

Tratamentos	ARN	UR	NO_3^-	NH_4^+
	$\mu\text{ mol NO}_2^- \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$	$\mu\text{ mol N-NH}_4^+ \text{ g MF}^{-1} \text{ h}^{-1}$	mg kg^{-1}	
3 DAP				
Controle	2,09 a	14,1	366,73	302,47
Ni	2,33 a	14,92	188,37	545,21
Mo	3,84 a	14,9	291,13	600,25
Ni Mo	2,51 a	14,85	274,24	664,39
N	0,58 c	14,96	225,00	299,25
N Ni	0,63 c	14,97	38,50	304,29
N Mo	2,96 a	14,96	233,33	412,16
N Ni Mo	2,16 a	14,96	175,00	421,09
ANOVA				
p-value	0,009	0,72ns	0,42	0,90
CV (%)	12,60	15,33	26,3	30,5
11 DAP				
Controle	1,16 a	14,92	88,66	63,00b
Ni	0,94 a	14,06	128,33	63,66b
Mo	0,59 b	14,69	149,33	66,5b
Ni Mo	1,11 a	14,71	63,00	63,66b
N	1,03 a	15,08	225,00	65,33b
N Ni	0,54 b	15,31	38,50	45,5b
N Mo	0,57 b	14,34	233,33	226,33a
N Ni Mo	0,67 b	14,86	175,00	115,5ab
ANOVA				
p-value	0,04	0,73ns	0,63	0,03
CV (%)	30,04	32,34	15	20,02

Os dados foram transformados para atender aos critérios de normalidade e homocedacidade.

A atividade da enzima redutase do nitrato (ARN) foi menor nos tratamentos N e N Ni no período de 3 dias após a aplicação foliar (DAPF) (Tabela 2). Após os 11 dias da aplicação os menores valores de ARN foram observados nos tratamentos Mo, N Ni, N Mo e N Ni Mo.

A diminuição da ARN nesses tratamentos pode estar relacionada a fitotoxidez ocasionada pela aplicação das soluções foliares. No segundo tempo de avaliação a redução na atividade da enzima redutase do nitrato está associada a aplicação combinada de nitrogênio com micronutrientes. A maior concentração de sais nas soluções com nitrogênio e micronutrientes, pode ter ocasionado desequilíbrio osmótico na superfície foliar. Os sintomas de fitotoxidez apresentaram-se na forma de queima, manchas de cor vinho e amarelecimento das folhas.

As diferenças nas taxas de absorção das formas de N estão relacionadas aos seus mecanismos de penetração na folha e propriedades físico-químicas e tamanhos dos íons de N. O nitrato é o íon iônico de maior tamanho que só consegue penetrar a cutícula através de poros

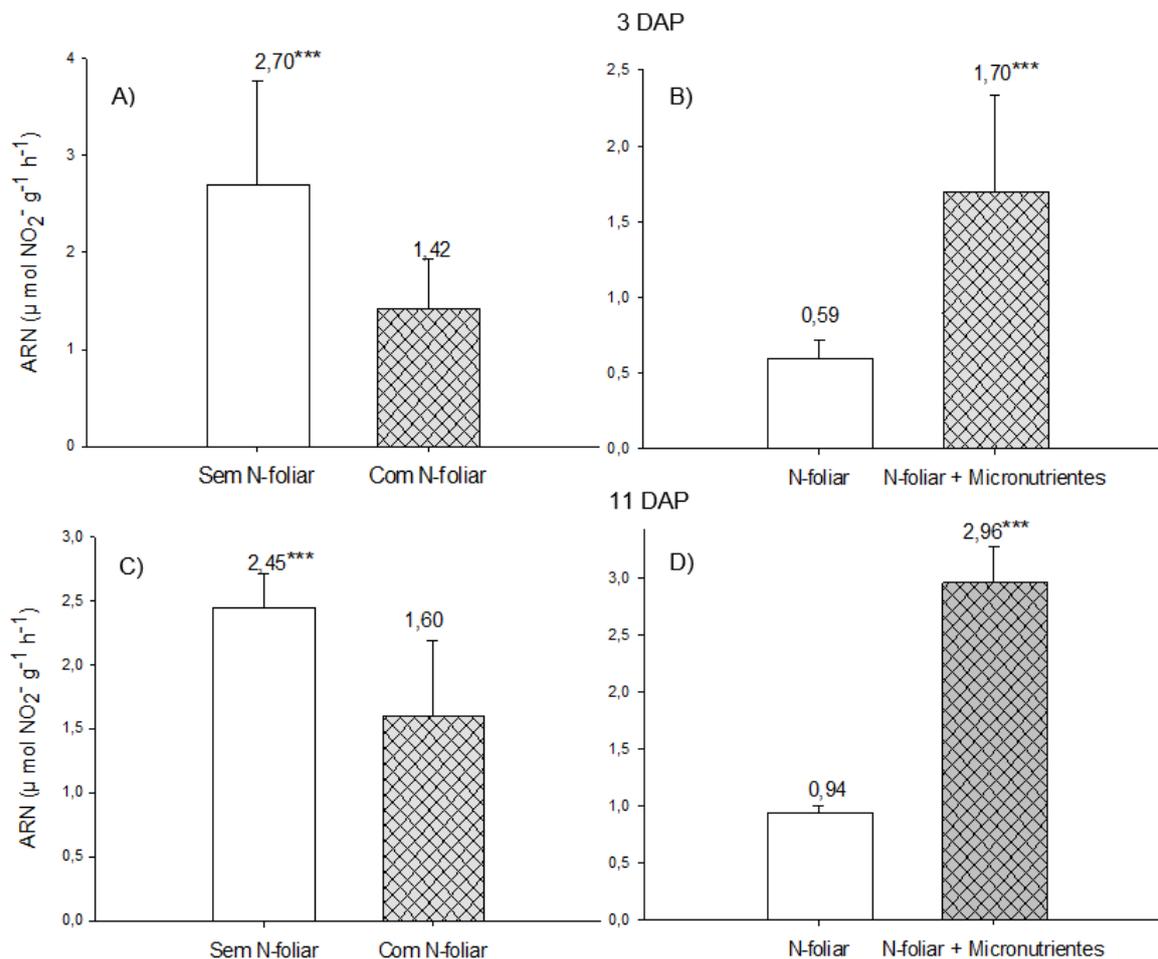
aqueos. Além disso, possui menor solubilidade e maior higroscopicidade. Ao contrário da ureia que é uma molécula menor, apolar, solúvel em água e consegue penetrar a cutícula pela via lipofílica e através de poros, resultando na absorção mais rápida em comparação com as outras formas de nitrogênio. Já o amônio possui solubilidade e higroscopicidade intermediária entre as formas de N e tem a sua absorção limitada pela carga residual (+). Isso explica sua taxa de absorção intermediária. (RIEDERER e SCHREIBER, 2001; EICHERT e GOLDBACH, 2008).

A aplicação do Mo isolado ou associado ao N não estimulou a ARN, considerando que a atividade dessa enzima nesses tratamentos foi igual a atividade no tratamento controle. Isso pode ter acontecido tanto pela fitotoxicidade no caso do tratamento N Mo, quando pela dose, que pode ter sido baixa, considerando que não existe recomendação para adubação foliar molibídica na cultura da cana-de-açúcar, tendo em vista que a aplicação isolada de molibdênio não ocasionou queima da área foliar.

A baixa resposta na ARN também pode ser devido ao teor de Mo nos tecidos serem suficientes para atender a atividade enzimática. O teor de Mo na folha +1 do tratamento que não recebeu aplicação foliar, já encontrava-se acima do nível crítico de $0,2 \text{ mg kg}^{-A1}$ (RAIJ e CANTARELLA, 1966), o que seria indicativo de que o solo utilizado no experimento já havia o suprimento necessário de molibdênio para a cana-de-açúcar.

Na análise de contraste ortogonais para a ARN (Figura 3) pode-se observar que quando as médias de atividade enzimática são agrupadas separando os tratamentos que receberam N-foliar dos que não receberam, e os que receberam N-foliar dos que receberam N-foliar+micronutrientes, é possível observar diferença significativa entre os grupos de tratamentos. O resultado mostra que aplicar solução foliar com nitrogênio diminui a ARN e que a aplicação de N-foliar+micronutrientes é mais vantajoso que aplicar N isolado quando se trata da atividade da enzima em ambos os tempos de avaliação.

Figura 3. Análise de contraste ortogonal comparando a atividade da enzima nitrato redutase (ARN) na folha +1 aos 3 dias (A; B) e 11 dias (C;D) após a aplicação das soluções nas folhas da variedade RB867515.



A atividade da urease não foi influenciada com a aplicação do N, Ni e Mo nos dois tempos de avaliação (Figura 3 C; D). A dose de N-NH₂ e Ni aplicada nas folhas, não estimulou a atividade da urease. A dose de níquel pode ser considerada baixa por não ter aumentado os teores de níquel na folha, apesar de haver tendência de teores maiores, em média, nos dois tempos quando o Ni foi aplicado (Figura 4). Esses resultados foram diferentes do resultado constatado por Zampazzo (2022), que relatou o aumento da atividade da enzima urease com a adubação via solo com níquel para a variedade RB867515.

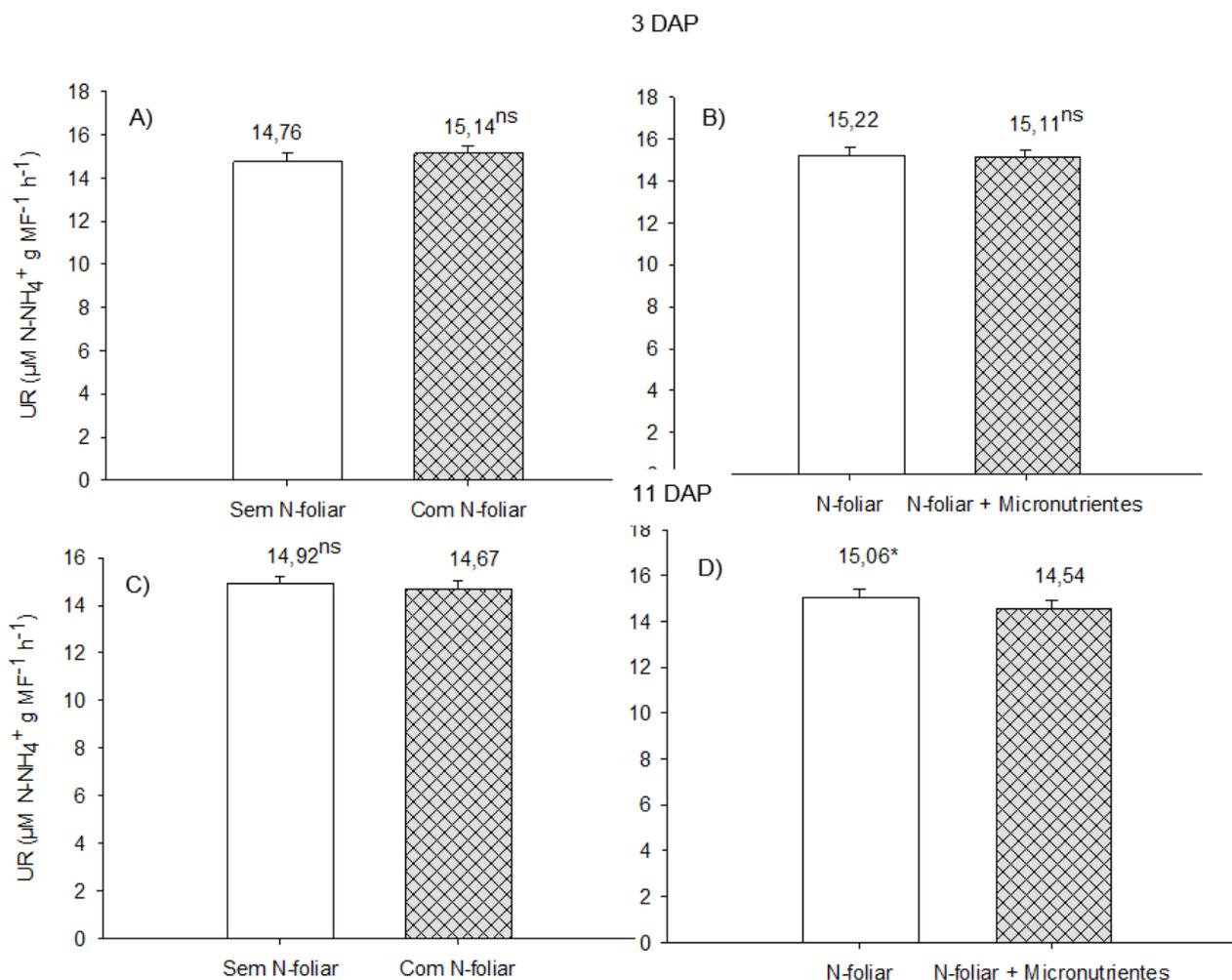
O níquel é cofator da enzima urease que atua na conversão de ureia em amônio e dióxido de carbono. A aplicação de níquel melhora o metabolismo da ureia endógena e exógena da planta. Após a hidrólise da ureia pela urease, o amônio é formado no processo que combina a glutamina pela enzima glutamina sintetase para formar glutamato. O glutamato sintetizado nesse processo é convertido em outros aminoácidos (SAKAMOTO; BRYANT.; 2001).

Como o N-NH₂ adicionado não influenciou na atividade da urease, o maior teor de NH₄⁺ foi encontrado nas folhas tratadas com o fertilizante nitrogenado que continha essa forma de N na composição, que não diferiu das folhas tratadas com apenas Ni após 11 dias da aplicação (Figura 3D). Indicando que o Ni pode ter contribuído para assimilação do N-NH₂ presente na planta no período avaliado.

Os resultados desse experimento servirão para trabalhos futuros com adubação foliar de níquel em cana-de-açúcar como parâmetro para seleção de doses com objetivo de aumentar a atividade da enzima urease, já que na literatura informações sobre adubação foliar de níquel em cana-de-açúcar são limitadas.

A atividade da urease não foi influenciada com a aplicação do N, Ni e Mo nos dois tempos de avaliação (Tabela 2). A dose de N-NH₂ e Ni aplicada nas folhas, não estimulou a atividade da urease. A dose de níquel pode ser considerada baixa por não ter aumentado os teores de níquel na folha, apesar de haver tendência de teores maiores, em média, nos dois tempos quando o Ni foi aplicado (Figura 4). Esses resultados foram diferentes do resultado constatado por Zampazzo (2022), que relatou o aumento da atividade da enzima urease com a adubação via solo com níquel para a variedade RB867515. O níquel é cofator da enzima urease que atua na conversão de ureia em amônio e dióxido de carbono. A aplicação de níquel melhora o metabolismo da ureia endógena e exógena da planta. Após a hidrólise da ureia pela urease, o amônio é formado no processo que combina a glutamina pela enzima glutamina sintetase para formar glutamato. O glutamato sintetizado nesse processo é convertido em outros aminoácidos (SAKAMOTO; BRYANT.; 2001). Como o N-NH₂ adicionado não influenciou na atividade da urease, o maior teor de NH₄⁺ foi encontrado nas folhas tratadas com o fertilizante nitrogenado que continha essa forma de N na composição, que não diferiu das folhas tratadas com apenas Ni após 11 dias da aplicação (Figura 3D). Indicando que o Ni pode ter contribuído para assimilação do N-NH₂ presente na planta no período avaliado. Os resultados desse experimento servirão para trabalhos futuros com adubação foliar de níquel em cana-de-açúcar como parâmetro para seleção de doses com objetivo de aumentar a atividade da enzima urease, já que na literatura informações sobre adubação foliar de níquel em cana-de-açúcar são limitadas.

Figura 4. Contraste ortogonal dos tratamentos foliares sobre a atividade da enzima urease (UR) na folha +1 da variedade de cana-de-açúcar RB867515, 3 dias após a aplicação foliar (DAP) (A;B) e 11 dias após a aplicação foliar (C;D).



Na análise de contrastes é possível observar diferença no segundo tempo de avaliação, quando foi comparado a aplicação de N-foliar de forma isolada e N-foliar+micronutrientes. É provável que esse efeito tenha sido proporcionado pela aplicação de níquel combinado com nitrogênio.

Teores de nitrato e amônio na folha

Os teores de NO_3^- nos tratamentos não diferiram em ambos os períodos de avaliação. Enquanto o teor de NH_4^+ diferiu apenas no terceiro dia após aplicação (Figura 3). O maior teor de NH_4^+ foi encontrado nos tratamentos que receberam o N Mo e N Ni Mo (Tabela 2).

A velocidade de absorção do íon de nitrato é baixa e menor que as outras formas de N, o que levaria a não ser observado diferença nesse parâmetro. Na segunda avaliação, aos 11 dias,

o NO_3^- pode ter sido assimilado, uma vez que após aplicação do N na folha, a média de NO_3^- foi menor, embora não observado diferença estatística.

A forma de nitrogênio absorvida em menor tempo pela folha da cana-de-açúcar é a forma amídica. Após a adubação foliar, 80% da ureia é absorvida pela cultura nas primeiras 48 horas (TRIVELLIN, 2000). O nitrato é absorvido em menor velocidade comparado as outras formas de nitrogênio (USCOLA, 2014).

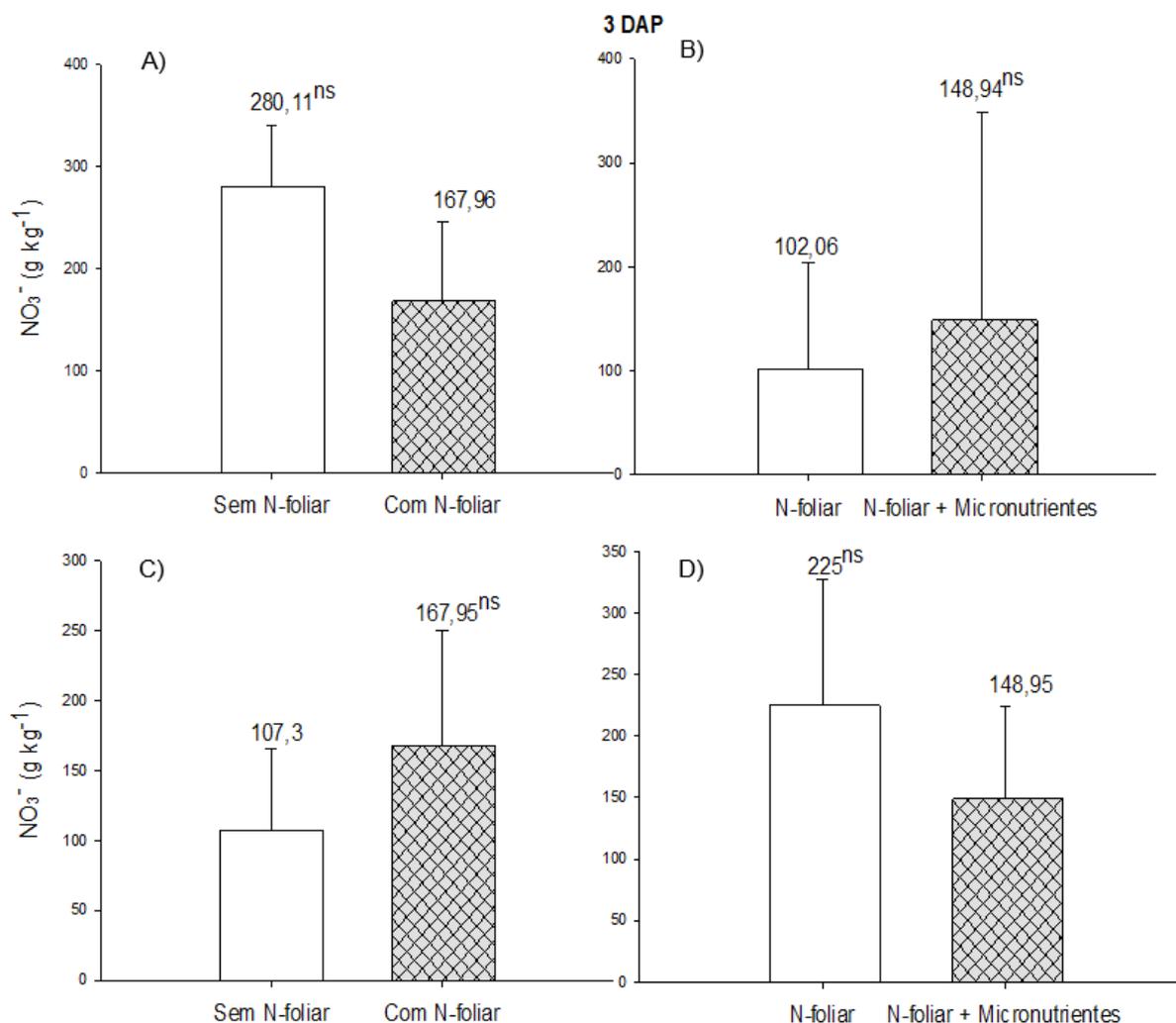
Ao contrário desses achados, Steiner (2015) avaliando a aplicação foliar de molibdênio na melhoria da absorção de nitrogênio e produção de girassol, constatou que as concentrações de nitrato nas folhas de girassol diminuíram com o aumento das doses de molibdênio aplicados via folha. Enquanto, relatou que na ausência de molibdênio, o feijoeiro acumula nitrato, sendo indicativo de baixa assimilação.

Brown et al. (1990) relataram que a deficiência de Ni resulta em acúmulos excessivos de nitrato na cevada e sugeriram que a nutrição com Ni inibe o acúmulo de nitrato e amônio nos tecidos vegetais, melhorando o metabolismo do nitrogênio e a síntese de proteínas. Matraszek (2008) relataram aumento da atividade da redutase de nitrato e redução do acúmulo de nitrato em raízes de alface cultivada hidroponicamente pela nutrição com Ni.

O conteúdo de nitrogênio do solo também pode ter influenciado o teor de nitrato na folha +1. O solo foi adubado com nitrogênio na forma amoniacal, entretanto, o amônio quando aplicado ao solo é rapidamente convertido a nitrato pelo processo de nitrificação em ambiente aeróbico. A granulometria do solo onde as plantas foram cultivadas era arenosa, proporcionando condições favoráveis a nitrificação. É provável que as plantas tenham absorvido o nitrato do solo e translocado para a parte aérea, onde a cultura apresenta maior atividade da redutase do nitrato (GARGANTINI, 1957; SANTOS, 2019).

Em experimento com aplicação de molibdênio e nitrogênio no solo em cultivo de cana-de-açúcar, os teores de nitrato na folha +1 da variedade RB867515 não reduziram, embora esse compartimento ter apresentado maior ARN em comparação com as raízes (SANTOS, 2019).

Figura 5. Contraste ortogonal dos tratamentos foliares sobre a teor de nitrato (NO_3^-) na folha +1 da variedade de cana-de-açúcar RB867515, 3 dias após a aplicação foliar (DAP) (A;B) e 11 dias após a aplicação foliar (C;D).

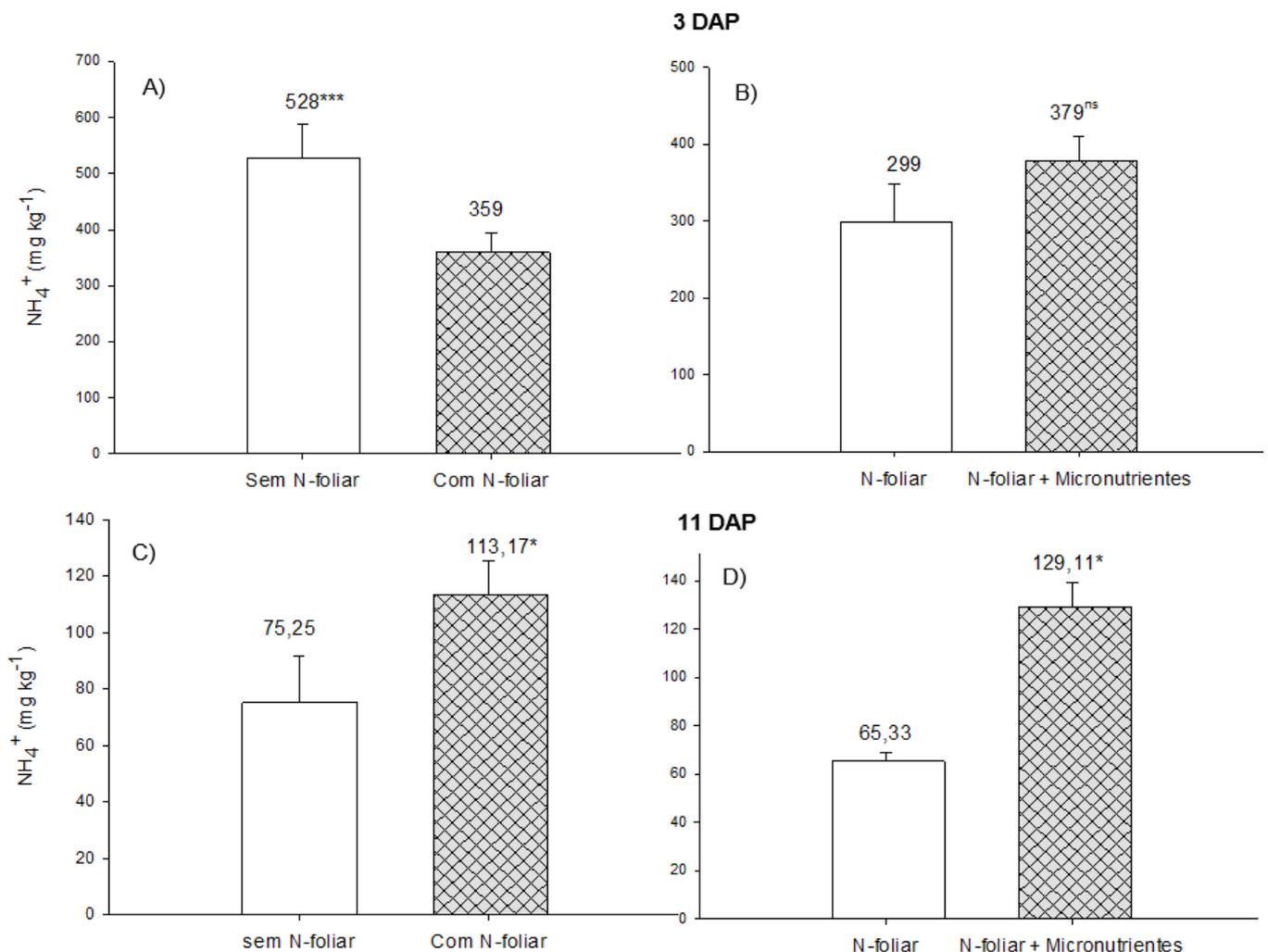


O teor de NH_4^+ na folha +1 aumentou com aplicação foliar do N e Mo e na combinação do N+Ni+Mo, aos 11 dias após aplicação, enquanto aos 3 dias, não foi observada diferença (Tabela 2). O aumento no teor de amônio com aplicação do N estão coerentes, já que esses tratamentos receberam nitrogênio na forma de NH_4^+ com a adubação foliar, porém a adição combinada do N com Ni não apresentou diferença e a adição do Mo manteve o teor baixo. Deste modo o ganho na nutrição nitrogenada deve-se apenas a aplicação do nutriente na folha, e não a melhoria da assimilação do N pelo Ni e Mo.

Aos 11 DAPF o teor na folha de NH_4^+ e NO_3^- foi menor, sendo indício da ocorrência da assimilação e remobilização do amônio para folhas mais novas, bem como o declínio fisiológico natural da folha (Tabela 2).

A análise de contrastes ortogonais para o teor de amônio (Figura 5) apresentou efeito significativo 3 dias após a aplicação foliar para a diferença entre os grupos sem N-foliar e com N-foliar (figura 5, A). Indicando o efeito negativo da aplicação de nitrogênio no aumento dos teores de amônio aos 3 dias após a aplicação, provavelmente devido a baixa assimilação nesse período. Enquanto aos 11 dias após a aplicação foi possível constatar o aumento do teor de amônio quando aplicados a fonte de nitrogênio combinada com micronutrientes.

Figura 6. Contraste ortogonal dos tratamentos foliares sobre o teor de amônio (NH_4^+) na folha +1 da variedade de cana-de-açúcar RB867515, 3 dias após a aplicação foliar (DAP) (A;B) e 11 dias após a aplicação foliar (C;D).



Hosseini (2013) relatou que a pulverização de Ni em alface resultou em diminuição significativa da concentração de amônio na parte aérea da planta. Entretanto aplicação de ureia e níquel não influenciou a concentração de amônio na parte aérea. Esse efeito do níquel na concentração de amônio, refletiu a ação no nutriente no aumento significativo da atividade da enzima urease.

A adição de Ni também pode melhorar o metabolismo da ureia endógena. A ureia endógena é produzida através da degradação de arginina, purfrinas e ureídeos dentro das células vegetais (HOLLAND e PALLACCO, 1992) em plantas com deficiência de níquel, aumentando a concentração de amônio.

Teores de Níquel e Molibdênio

A aplicação de Ni não aumentou dos teores na folha aos 3 e 11 DAPF (Figura 6A; C). De modo distinto, Oliveira et al. (2021) realizou um estudo sobre análise in situ da absorção de Ni da aplicação foliar em noz-pecã usando análise instrumental μ XR, que indicou o aumento de 99% em comparação ao tratamento controle nas concentrações de Ni após 12 dias da aplicação foliar.

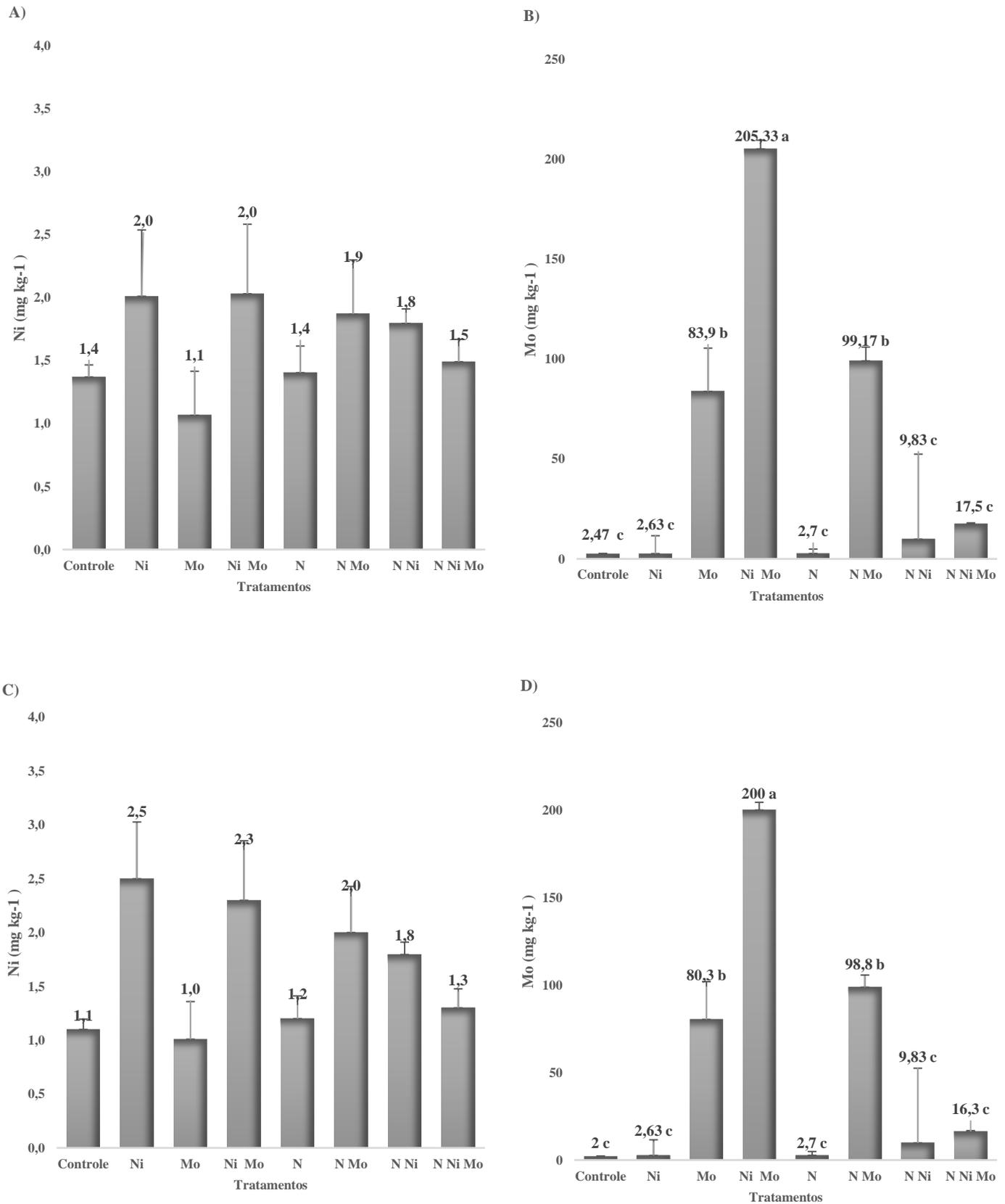
Diferentes mecanismos estão envolvidos na absorção de metais na planta via foliar. As etapas principais envolvidas na absorção foliar incluem a adsorção e internalização via cutícula, e penetração via poros estomáticos. Vários metais como Cu e Mn podem atravessar a cutícula da folha das plantas. No entanto, a penetração da cutícula depende das características da cutícula de cada espécie e de fatores ambientais (NAIR; SHAHIDA et al., 2017). É provável que o Ni não seja facilmente absorvido pelas folhas de cana de açúcar.

O oposto aconteceu com os teores de Mo, a aplicação de foliar contendo Mo resultou em aumento no teor da folha que recebeu o nutriente nos dois tempos avaliados (Figura 6 B;D). Os maiores teores foram observados nos tratamentos em que o Mo foi associado ao Ni, com incremento de mais 100 vezes em ambos os tempos.

Para que haja a absorção e translocação de nutrientes na planta, é preciso ação dos transportadores de cada elemento. Nas folhas, a expressão do transportador de molibdato MOT1 aumenta gradualmente à medida que os níveis de aplicação de Mo também aumentam, isso indica que há uma resposta de MOT1 à disponibilidade de molibdato em plantas. Isso sugere que uma aplicação foliar apropriada de Mo pode melhorar a capacidade de absorção de Mo, o que concordaria com Nie et al. (2004) relataram que as taxas de absorção de Mo em duas cultivares de trigo de inverno aumentaram à medida que a taxa de aplicação de Mo aumentou de baixa para moderada.

A concentração de molibdênio nas folhas tende a aumentar com a aplicação foliar, principalmente quando existe baixa disponibilidade do nutriente no solo (STEINER et al, 2015). Skarpa et al. (2013) descreveu o aumento do teor de molibdênio na biomassa vegetal no estágio R-1 de desenvolvimento do girassol. Mellis et al. (2022) encontrou resultados semelhantes em cana-de-açúcar, o fornecimento de molibdênio aumentou o teor de molibdênio e foi proporcional ao aumento das doses de nitrogênio.

Figura 7. Teor de níquel (A;C) e molibdênio (B;D) na folha +1 da variedade RB8675 aos 3 e o 11 DAPF, respectivamente.

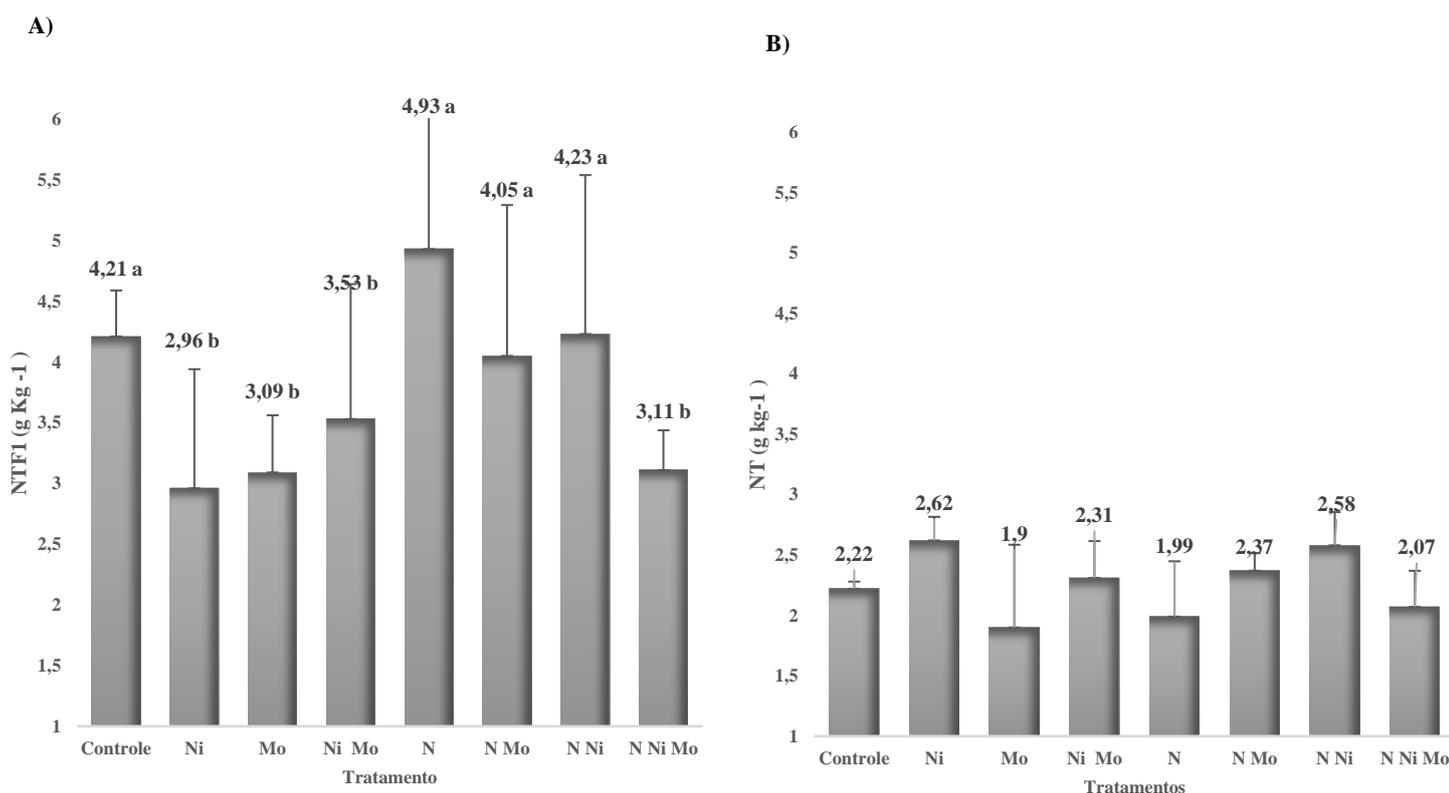


Teor total de N na parte aérea

O teor médio total de N na folha aos 202 dias está abaixo do nível crítico (ANTONIO et al., 2015). Mesmo baixo, se observou efeito residual das aplicações foliares realizadas a 44 dias com teor de N-total maior nas folhas que recebeu a adubação nitrogenada. A adição de Ni ou Mo associado ao N na adubação foliar não diferiu nos teores totais de N aos 202 dias (Figura 7A).

Quando o Ni e Mo foram aplicados isoladamente, o teor total de N não diferenciou do controle, o que mostra pouca contribuição da aplicação isolada desses nutrientes na nutrição nitrogenada da cana-de-açúcar (Figura 7 A).

Figura 8. Nitrogênio total da folha +1 (NTFA) (A) e da planta toda (NPT) (B) da variedade de cana-de-açúcar RB867515 aos 202 dias após o plantio.



De maneira geral, os teores de N total encontrados nesse trabalho foram baixos comparados aos teores de nitrogênio encontrados para a cana-de-açúcar. Isso pode ser atribuído as condições climáticas atípicas durante o período de execução do experimento. Para os meses de maio e junho a chuva acumulada foi maior que 800 mm, chegando a inundar o solo do

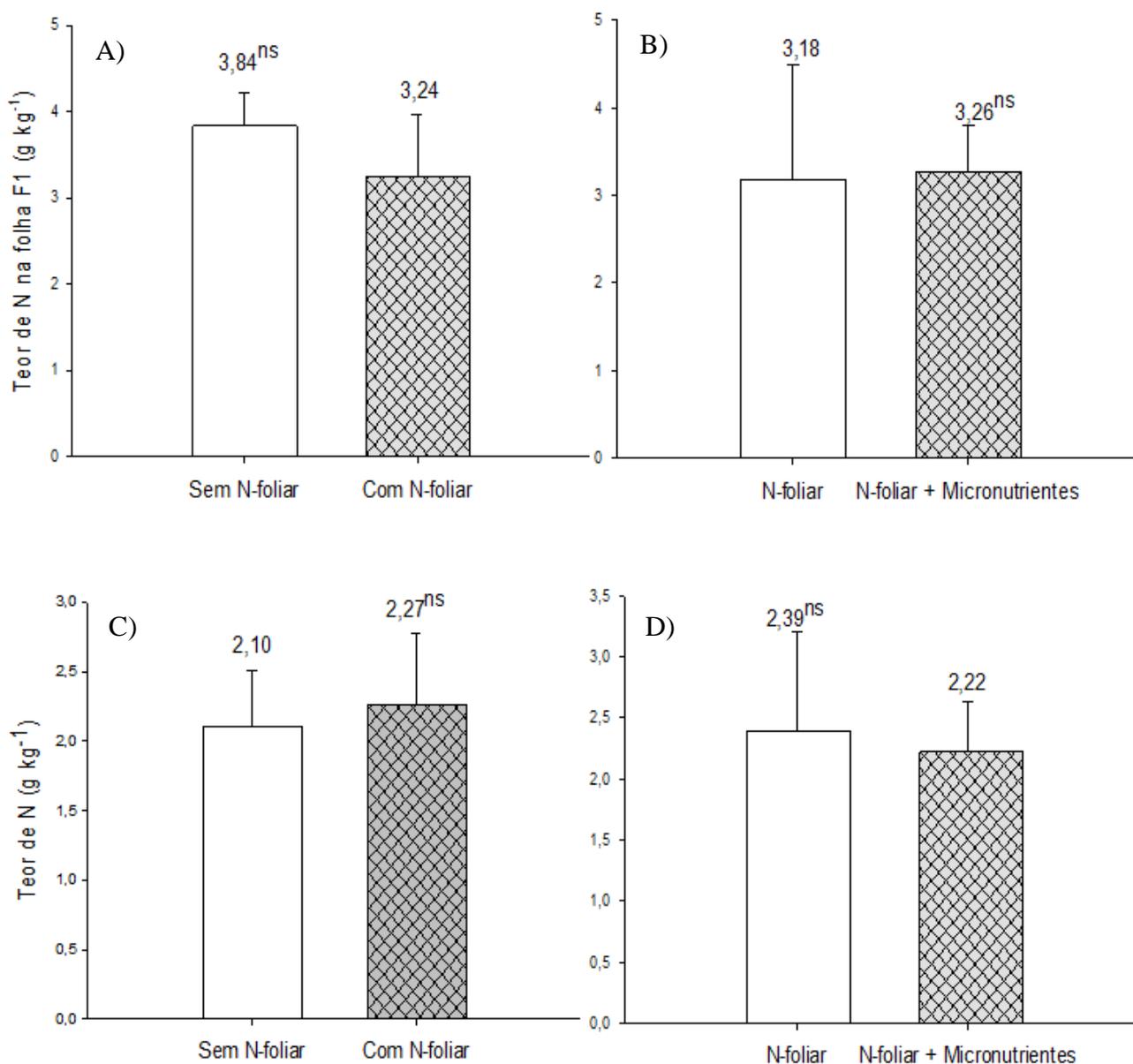
experimento e contribuindo para a lixiviação e desnitrificação do nitrogênio do solo. No período de aplicação o clima era favorável, entretanto, acredita-se que o aporte de nitrogênio do solo tenha diminuído e a dose de aplicação foliar não foi suficiente para elevar o teor de N.

Andrade (2021) demonstrou que a variação do teor N encontrada ao longo do tempo na cana-de-açúcar e atribuiu a diminuição a modificação da oferta de N no sistema provocado pelas perdas. Nesse estudo aos 150 dias após o plantio a lixiviação de N no solo contribuiu para reduzir a quantidade de N disponível solo e redução dos teores de N dos tratamentos que só receberam adubação exclusiva no solo. No entanto, a aplicação foliar de N contribuiu para o aumento do teor de N. No caso dos resultados desse estudo, a dose de N-foliar foi menor que a dose aplicada por Andrade (2021) e por isso a adubação foliar não elevou o teor de N da parte aérea da planta.

Existem informações na literatura que comprovam o aumento do teor de N com a aplicação foliar de N e atribuem esse aumento a melhoria do processo assimilatório (CHENG e FUCHIGANI; 2001., WOOLFOLK et al; 2002., LYU et al; 2022).

Oliveira et al., (2013) verificaram, em cana planta, que os teores de N na folha caem de $13,2 \text{ g.kg}^{-1}$ aos 120 DAP para $2,7 \text{ g.kg}^{-1}$ aos 480 DAP. E, Gava et al., (2019) constataram, em cana soca, que os teores de N caem de 20 g.kg^{-1} aos 120 dias após o corte para 12 g.kg^{-1} aos 340 dias após o corte. De acordo com Santana et al., (2020) a diluição dos teores de N ao longo do ciclo na cana-de-açúcar ocorre de forma exponencial, independentemente da dose aplicada na adubação.

Figura 9. Contraste ortogonal dos tratamentos foliares sobre o teor de N na folha que recebeu aplicação foliar (teor de N na folha F1) (A;B) e teor de N da planta (teor de N) (C;D), da variedade RB867515, aos 202 dias do ciclo de cultivo.



Biometria e produção de biomassa

O aumento na folha da ARN e dos teores de NH_4^+ com a adubação nitrogenada, bom como o incremento do Mo com aplicação foliar, não proporcionaram incrementos no crescimento e na produção de biomassa da planta (Figuras 6; 7; 8). Os parâmetros biométricos altura e diâmetro dos entrenós correspondentes as folhas +1 e +2 não apresentaram diferença, exceto para a altura do entrenó da folha +3. Ni e N Mo reduziram a altura do entrenó da folha +3 (Figura 9). Lopes et al (2014) e Barbosa et al (2010) avaliou a aplicação de Ni e Mo em

feijoeiro e observou que características de crescimento e componentes de produção, também não foram afetados pelos micronutrientes. O diâmetro dos entrenós correspondentes as folhas que receberam aplicação foliar (folhas +1, +2 e +3) também não foram influenciados pelos tratamentos (Figura 10).

Em 48 h da aplicação foliar de N, Ni e Mo foi observado pontos de saturação com toxidez foliar e perda de tecido vivo (Figura 1). Deste modo, a ausência do efeito dos tratamentos no crescimento pode ter sido ocasionada devido a redução da área fotossintética da folha devido ao estresse submetido e a queima das folhas, sendo o período avaliado insuficiente para que fotossimilados produzidos e as novas folhas das folhas promovessem ganhos e resposta em biomassa.

Com os resultados de nitrogênio total da parte aérea, era esperado que não houvesse o aumento da resposta dos parâmetros biométricos da planta. É provável que o resultado seja atribuído aos sinais de fitotoxicidade nos tratamentos (Apêndice C). As folhas das plantas apresentaram queima após a aplicação das soluções foliares. Isso ocasionou perda da área fotossintética da planta, que demandou energia para a produção de folhas novas e essas folhas novas não conseguiram atender a demanda energética da planta quando foi realizada a avaliação. Talvez o tempo de 45 dias após aplicação dos tratamentos tenha sido curto para avaliar os possíveis efeitos na biometria e biomassa.

Kumar et al. (2018) mostrou que a aplicação foliar de Ni até 0,2% aumentou a altura da planta e o índice de esverdeamento das folhas de trigo, entretanto, efeito adversos foram observados em concentrações maiores de Ni. E que os valores de SPAD foliar, altura da planta e contagem de perfilhos exibiram tendências decrescentes.

Figura 10. Altura dos entrenós correspondentes as folhas +1, +2 e +3, da variedade de cana-de-açúcar RB867515, aos 202 após o plantio.

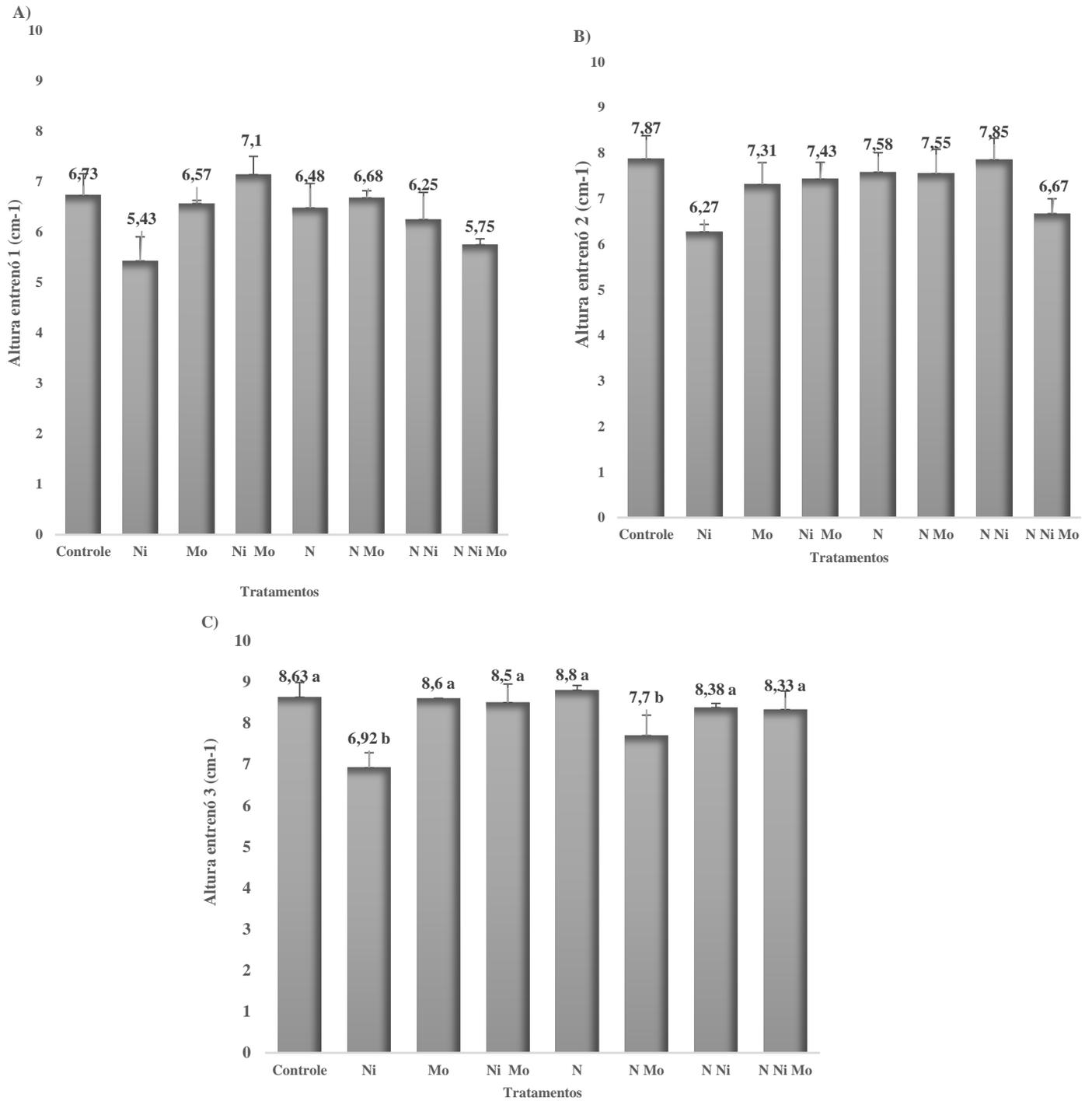


Figura 11. Diâmetro dos entrenós correspondentes as folhas +1, +2 e +3, da variedade de cana-de-açúcar RB867515, aos 202 após o plantio.

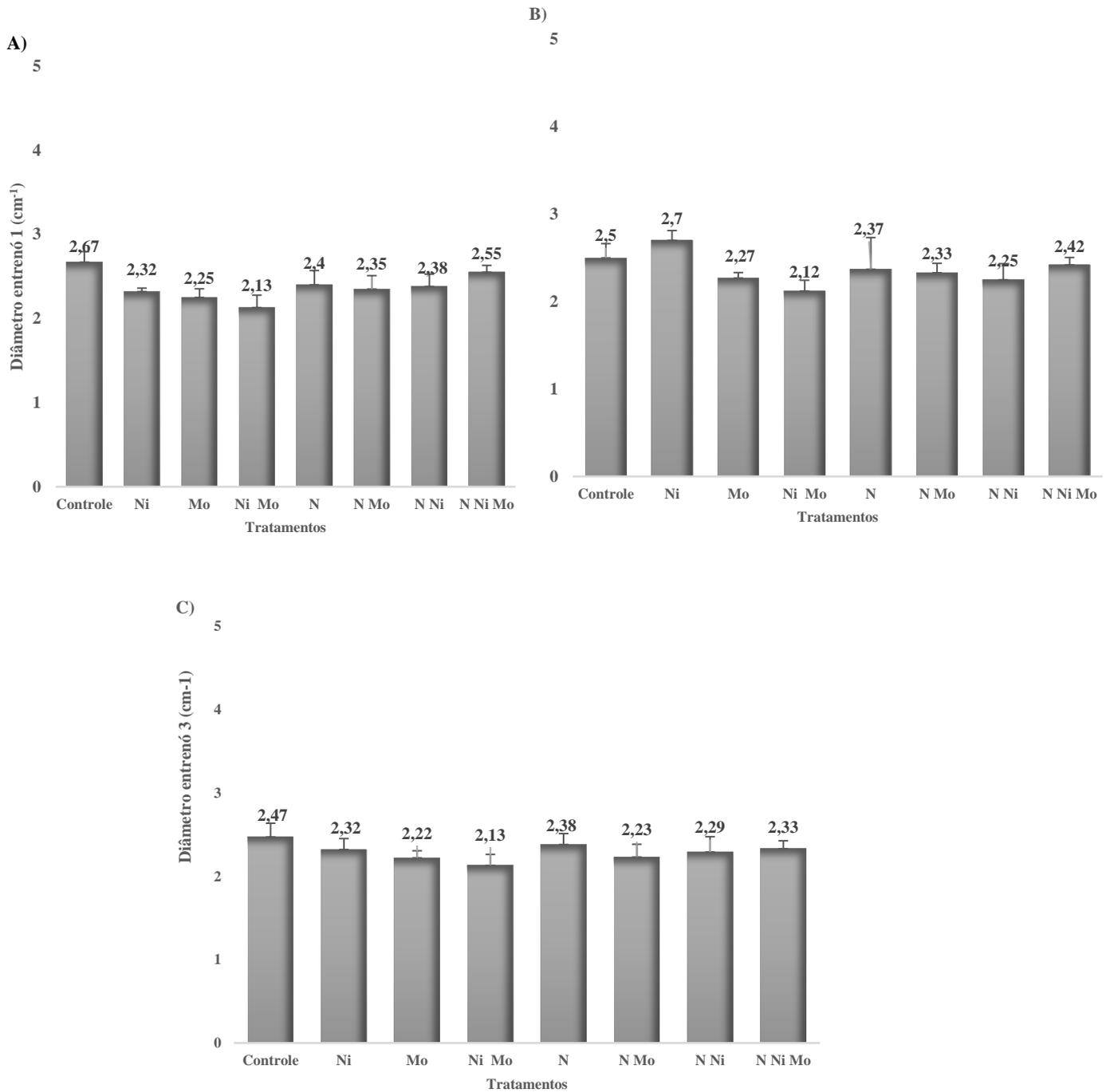
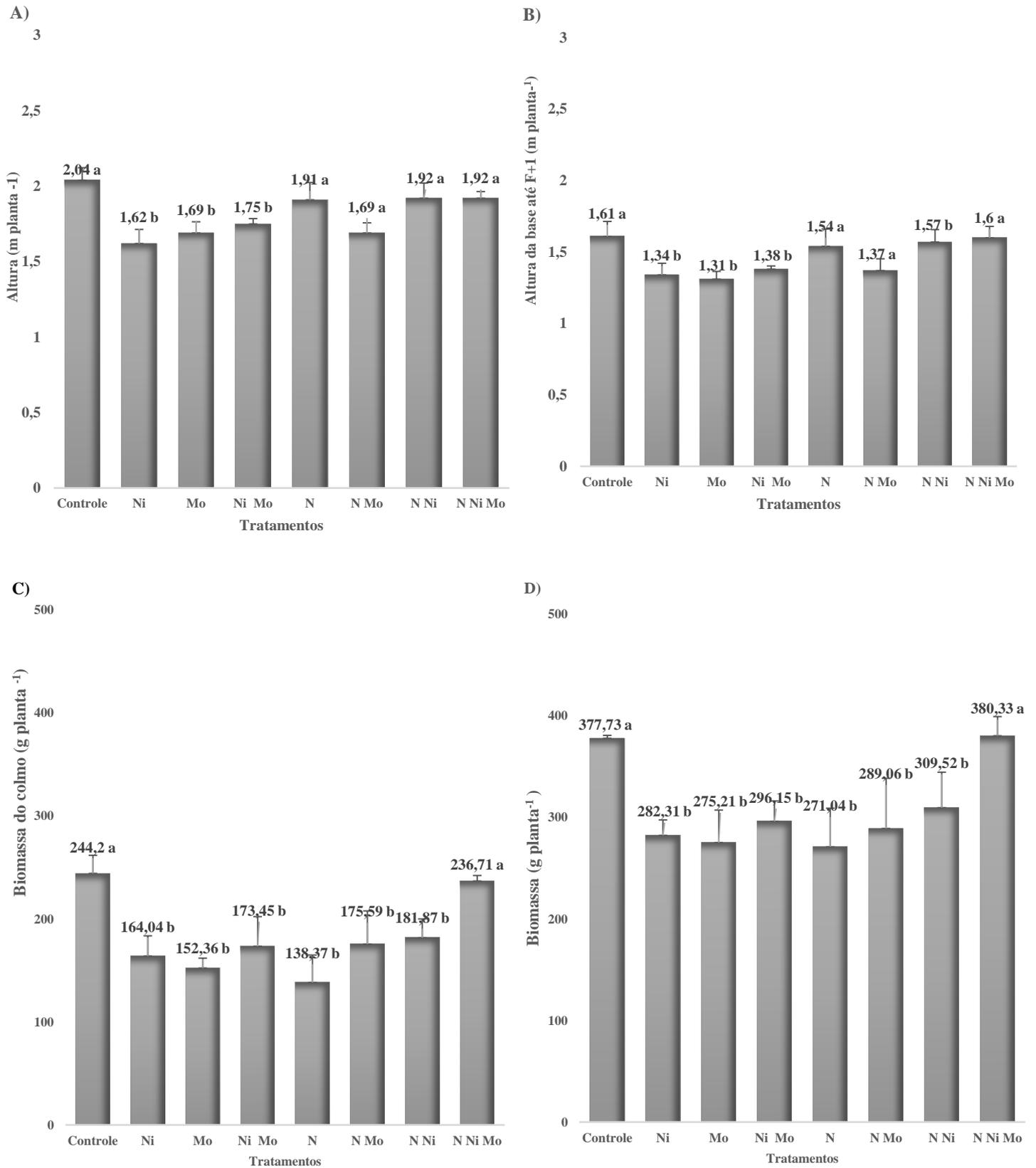


Figura 12. Altura média das planta (A), diametro médio do colmo (B), biomassa do colmo (C) e biomassa total (D), da variedade de cana-de-açúcar RB867515, aos 202 dias após o plantio.



Para os próximos estudos com adubação foliar de nitrogênio, níquel e molibdênio é necessário o aumento no período de avaliação para que seja possível confirmar se a resposta nos parâmetros de crescimento e desenvolvimento foi condicionada pelo tempo curto de realização das avaliações, já que os efeitos do níquel e molibdênio aplicados na folha da cana-de-açúcar não estão completamente elucidados.

6 CONCLUSÕES

O Mo aplicado foliar não influenciou na atividade da redutase do nitrato. Apenas na presença do N-NO_3^- aplicado na folha houve aumento da atividade enzimática dessa enzima.

A atividade da urease não foi influenciada pela adubação foliar contendo N, Ni ou Mo.

O teor de NO_3^- não diferiu em ambos os tempos de avaliação. Enquanto o amônio foi maior quando se aplicou Ne Ni.

O teor de Ni não diferiu com aplicação foliar desse nutriente. Porém o teor de Mo aumentaram quando o nutriente foi aplicado na folha.

O teor de N na folha apresentou efeito residual e permaneceu maior com a aplicação foliar de N na folha. A aplicação isolada de Ni e Mo manteve os teores de N baixos na folha.

Os parâmetros biométricos e a biomassa da planta não aumentaram no período de 45 dias após a aplicação foliar.

A adubação foliar de Ni e N possui potencial para aumentar a assimilação de N na cana-de-açúcar, no entanto, não promoveu ganhos no crescimento e produção de biomassa.

7 AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela formação científica necessária a realização da pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela concessão da bolsa de mestrado.

A Ubyfol pela parceria e financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, J. J. Eficiência da adubação nitrogenada foliar na cana-de-açúcar. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do solo, Recife, 2021. Disponível em: <http://www.tede2.ufrpe.br:8080/tede/bitstream/tede2/8836/2/Joel%20Jose%20de%20Andrade.pdf>.
- ANTONIO, H.; JORIS W.; CANTARELLA, H. Nitrogênio na produção de cana-de-açúcar: aspectos agronômicos e ambientais. Tese (doutorado) – Instituto Agrônômico de Campinas, Programa de Pós-Graduação Em Agricultura Tropical e Subtropical, Campinas, 2015. Disponível em: <https://www.iac.sp.gov.br/areadoinstituto/posgraduacao/repositorio/storage/pb1213011.pdf>.
- BAI, C; REILLY, C. C.; WOOD, B. W. Nickel Deficiency Disrupts Metabolism of Ureides, Amino Acids, and Organic Acids of Young Pecan Foliage. **Plant Physiology**, v. 140, n. 2, p. 433-443, 13 jan. 2006. <https://doi.org/10.1104/pp.105.072983>.
- BROWN, P. H.; WELCH, R. M.; CARY, E. E.; CHECKAI, R. T. Micronutrients. **Journal of Plant Nutrition**, v. 10, n. 9, p. 2125-2135, jun. 1987. <https://doi.org/10.1080/01904168709363763>.
- BROWN, P. H.; WELCH, R. M.; CARY, E. E. Nickel: A Micronutrient Essential for Higher Plants. **Plant Physiology**, v. 85, n. 3, p. 801-803, 1 nov. 1987. <https://doi.org/10.1104/pp.85.3.801>.
- BROWN, P.H.; WELCH, R. M.; MADISON, J. T. Effect of nickel deficiency on soluble anion, amino acid, and nitrogen levels in barley. **Plant and Soil**, v. 125, n. 1, p. 19-27, jun. 1990. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/bf00010740>.
- BUENO, A.; ALFRHAN, A.; ARAND, K.; BURGHARDT, M.; DEINIGER, A. C.; HEDRICH, R.; LEIDE, J.; SEUFERT, P.; STAIGER, S.; REIDERER, M. Effects of temperature on the cuticular transpiration barrier of two desert plants with water-spender and water-saver strategies, **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 70, n. 5, p. 1613-1625, 2019. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz018>
- CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**, 1ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, p.376-448, 2007.
- DAROS, E.; OLIVEIRA, R. A.; SOUZA, G. V. Variedades RB desenvolvidas pela RIDESA. In: _____ (org.). **45 anos de variedades RB de cana-de-açúcar: 25 anos de Ridesa** 1º Ed, Curitiba: Graciosa, p.35, 2015.
- 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, 11 nov. 1983. <https://doi.org/10.1126/science.222.4624.621>.
- ESKEW, David L.; WELCH, Ross M.; NORVELL, Wendell A. Nickel in Higher Plants. **Plant Physiology**, v. 76, n. 3, p. 691-693, 1 nov. 1984. <https://doi.org/10.1104/pp.76.3.691>.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAOSTAT. Rankings. 2017.

FERNANDES, A. C. **Cálculos na agroindústria de cana de açúcar**. Piracicaba: STAB, 2011.

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>

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>

FRANCO, H. C. J.; TRIVELIN, P. C. O.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; OTTO, R. 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>

GHILBERTO, P. J.; LIBARDI, P. L.; TRIVELIN, P. C. O. Nutrient leaching in an Ultisol cultivated with sugarcane. **Agricultural Water Management**, Dordrecht, v. 148, p. 141-149, 2015. <http://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.09.027>

INSTITUTO AGRONÔMICO DE PESQUISA. **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco: 2a. aproximação**. Francisco José de Albuquerque Cavalcanti. (coord.) 3ª ed. □ IPA. 212 p. Recife, PE: 2008.

LEAL, M.R.L.V.; WALTER, A.S.; SEABRA, J.E.A. Sugarcane as an energy source. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 3, p. 17-26, 2013. <https://doi.org/10.1007/s13399-012-0055-1>

LU, J.; BAI, Z.; VELTHOF, G. L.; CHADWICK, D. & MA, L. Accumulation and leaching of nitrate in soils in wheat-maize production in China. **Agricultural Water Management**, Dordrecht, v. 212, p. 407-415, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.039>

MELLIS, E. V.; QUAGGIO, J. A.; BERACI, G. R. G.; TEIXEIRA, L. A. J.; CANTARELA, H.; DIAS, F. L. F.; Effect of Micronutrients Soil Supplementation on Sugarcane in Different Production Environments: Cane Plant Cycle. **Agronomy journal**, v. 108, p. 2060-2070. 2016. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0563>

MORAES, M. F. et al. 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, dez. 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 de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1343-1252, 2010. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832010000400031>

OTTO, R.; CASTRO, S. A. Q.; MARIANO, E.; CASTRO, S. G. Q.; FRANCO, H. C. J. Nitrogen use efficiency for sugarcane-biofuel production: what is next? **Bioenergy Research**, Nova York, v. 9, p. 1272-1289. 2016. <http://doi.org/10.1007/s12155-016-9763-x>

PRADO, R. de M. **Nutrição de plantas**. 2ed. São Paulo: Editora Unesp, 2020, 414 p.

RAHMAN, Hasinur *et al.* Effects of Nickel on Growth and Composition of Metal Micronutrients in Barley Plants Grown in Nutrient Solution. **Journal of Plant Nutrition**, v. 28, n. 3, p. 393-404, 16 mar. 2005. <https://doi.org/10.1081/pln-200049149>.

ROBINSON, N., *et al.* Nitrate Paradigm Does Not Hold Up for Sugarcane. **Plos One**, v. 6, n. 4, p. 19045, 28 abr. 2011. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0019045>

RUAN, J.; GEREDÁS, J. Absorption of foliar-applied urea-¹⁵N and the impact of low nitrogen, potassium, magnesium and sulfur nutritional status in tea (*Camellia sinensis* L.) plants. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 61, p. 653-663, 2015. <https://doi.org/10.1080/00380768.2015.1027134>

SAKAMOTO, Toshio; BRYANT, Donald A. Requirement of Nickel as an Essential Micronutrient for the Utilization of Urea in the Marine Cyanobacterium *Synechococcus* sp. PCC 7002. **Microbes and Environments**, v. 16, n. 3, p. 177-184, 2001. <https://doi.org/10.1264/jsme2.2001.177>.

SANTANA, A. C. A.; OLIVEIRA, E. C. A.; SILVA, V. S. G.; SANTOS, R. L.; SILVA, M. S.; FREIRE, F. J. 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. dos; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, E. C. A. de; BARBOSA, J. de A.; MOURA, M. J. A. de; LOPES, N. R. da C.; COSTA, L. G. de A. F. C.; GUEDES, V. H. de F.; OLIVEIRA, D. M. de A.; SANTOS, M. B. da 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. [doi:10.1080/00103624.2017.1421648](https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1421648)

SANTOS, R. L. dos; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, E. C. A. de; FREIRE, M. B. G. dos S.; WEST, J. B.; BARBOSA, J. de A.; MOURA, M. J. A. de; BEZERRA, P. da 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. 1-19, 2019. [doi:10.1590/18069657rbc20180171](https://doi.org/10.1590/18069657rbc20180171)

SHIVALINGAMURTHY, S.; ANANGI, R.; KALAIPANDIAN, S.; KING; ERA, A. Identification and functional characterization of sugarcane invertase inhibitor (ShINH1): A potential candidate for reducing pre- and post-harvest loss of sucrose in sugarcane. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 598, 2018. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00598>

SILVA, A. M. S. **Eficiência do manejo da adubação nitrogenada na cana soca cultivada em solo arenoso da região do Nordeste do Brasil**. 2019. 107 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Departamento de Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2019.

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

TREDENICK, E.; FARRELL, T. W.; FORSTER, W. A.; PSALTIS, S. T. P. Nonlinear porous diffusion modeling of hydrophilic ionic agrochemicals in stomatous plant cuticle aqueous pores: A mechanistic approach. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 8, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00746>

TRIVELIN, P. C. O. **Utilização do nitrogênio pela cana-de-açúcar: Três casos estudados com uso do traçador ¹⁵N**. 2000. 175f. Livre docência (Isótopos Estáveis) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

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

TRIVELIN, P. C. O.; LARA CABEZAS, W.A.R.; VICTORIA, R.L.; REICHARDT, K. Evaluation of a ¹⁵N plot design for estimating plant recovery of fertilizer nitrogen applied to sugarcane. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 51, p. 226-234, 1994. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90161994000200005>

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**, v. 26, n. 3, p. 637-646, 2002. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832002000300008>

USCOLA, M.; SALVADOR, P. V.; OLIET, J. & WARREN, CHARLES R. Foliar absorption 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>

VAN GENUCHTEN, Rien. Welcome to. **Vadose Zone Journal**, v. 1, n. 1, p. 1, 2002. <https://doi.org/10.2136/vzj2002.0001>.

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. 667, p. 96-102, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.029>

WELCH, Ross M.; SHUMAN, Larry. Micronutrient Nutrition of Plants. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 14, n. 1, p. 49-82, jan. 1995. <https://doi.org/10.1080/07352689509701922>.

WOOD, R. A. The roles of nitrogen, phosphorus and Potassium in the production of sugarcane in South Africa. **Fertilizer Research**, v. 26, n. 1-3, p. 89-98, dez. 1990. <https://doi.org/10.1007/bf01048746>.

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>

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, p. 290-301, 2014. <https://doi.org/10.1111/jac.12084>

ZHAO, H.; LI, X.; JAING, Y. Response of nitrogen losses to excessive nitrogen fertilizer application in intensive greenhouse vegetable production. **Sustainability**, Basiléia, v. 11, p. 1513, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11061513>

ZHENG, H.; LUI, Z.; NIE, X.; ZUO, J. & WANG, L. Comparison of active nitrogen loss in four pathways on a sloped peanut field with red soil in china under conventional fertilization conditions. **Sustainability**, Basiléia, v.11, p. 6219, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11226219>

ZHU, J.; HE, N.; WANG, Q.; YUAN, G.; WEN, D.; YU, G. & JIA, Y. The composition, spatial patterns, and influencing factors of atmospheric wet nitrogen deposition in Chinese terrestrial ecosystems. **Science of the total environment**, Amsterdam, v.511, p.777-785, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.12.038>

APÊNDICE A – Área experimental.**Figura 12.** Imagem da área experimental

APÊNDICE B – Lísímetros utilizados na condução do experimento.

Figura 13. Lísímetro utilizados na condução do experimento.

