



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

PAULO HENRIQUE CAZARIM

**ENRIQUECIMENTO DE SEMENTES DE SOJA COM  
COBALTO, MOLIBDÊNIO E NÍQUEL:  
PRODUÇÃO, QUALIDADE DAS SEMENTES E REFLEXOS  
NO CRESCIMENTO E NA NODULAÇÃO**

---

Londrina  
2025

PAULO HENRIQUE CAZARIM

**ENRIQUECIMENTO DE SEMENTES DE SOJA COM  
COBALTO, MOLIBDÊNIO E NÍQUEL:  
PRODUÇÃO, QUALIDADE DAS SEMENTES E REFLEXOS  
NO CRESCIMENTO E NA NODULAÇÃO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Agronomia.

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Inês Cristina de Batista Fonseca.

Coorientador: Prof. Dr. André Sampaio Ferreira.

Londrina  
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

C386e Cazarim, Paulo Henrique .

Enriquecimento de sementes de soja com cobalto, molibdênio e níquel : produção, qualidade das sementes e reflexos no crescimento e na nodulação / Paulo Henrique Cazarim. - Londrina, 2025.  
83 f. : il.

Orientador: Inês Cristina De Batista Fonseca.

Coorientador: André Sampaio Ferreira.

Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2025.

Inclui bibliografia.

1. Glycine max (L.) Merrill - Tese. 2. Manejo de micronutrientes - Tese. 3. Produtividade de sementes - Tese. 4. Qualidade fisiológica - Tese. I. De Batista Fonseca, Inês Cristina . II. Sampaio Ferreira, André . III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. IV. Título.

CDU 63

PAULO HENRIQUE CAZARIM

**ENRIQUECIMENTO DE SEMENTES DE SOJA COM  
COBALTO, MOLIBDÊNIO E NÍQUEL:  
PRODUÇÃO, QUALIDADE DAS SEMENTES E REFLEXOS  
NO CRESCIMENTO E NA NODULAÇÃO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Agronomia.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Coorientador: Prof. Dr. André Sampaio Ferreira  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Prof. Dr. Claudemir Zucareli  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Gabriela Machineski da Silva  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Prof. Dr. Adônis Moreira  
Universidade Estadual de Londrina – UEL /  
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária –  
EMBRAPA SOJA

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Nídia Raquel Costa  
Agri Support

Londrina, 25 de fevereiro de 2025.

Dedico este trabalho às pessoas que, desde o início, quando decidi que me formaria Engenheiro Agrônomo, acompanharam o meu esforço e dedicação, e sempre acreditaram em mim, me dando força e incentivo: meus pais, **Luiz Antonio Cazarim** e **Zenilda Maria Sinegallia Cazarim**, meu irmão, **Luiz Guilherme Cazarim**, demais familiares e amigos.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde e determinação para continuar seguindo em frente diante de todas as dificuldades.

À Universidade Estadual de Londrina, em especial ao Programa de Pós-graduação em Agronomia, pela infraestrutura e pela oportunidade de cursar o Doutorado ao lado de grandes profissionais.

Aos meus orientadores, Professora Dr.<sup>a</sup> Inês Cristina de Batista Fonseca e Professor Dr. André Sampaio Ferreira, pela orientação, confiança, disponibilidade, amizade e ensinamentos transmitidos.

Ao Professor Dr. Claudemir Zucareli, por ter sido meu orientador inicial, contribuindo em grande parte para a estruturação deste projeto, pela disponibilidade, amizade e ensinamentos transmitidos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pela bolsa de estudos concedida, a qual foi de grande importância no decorrer deste período.

À empresa Nutritem Indústria e Comércio Ltda, pela parceria na execução deste projeto, auxiliando com o fornecimento de fertilizantes foliares e adjuvantes, com custeio de análises químicas de solo, de folhas, de sementes, de equipamentos de proteção individual, e também de materiais de consumo em geral.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Soja), por ter nos permitido fazer análises de teores de óleo, proteína e de ácidos graxos em seu Laboratório de Análises Físico-Químicas e Cromatográficas, sob auxílio do Analista Químico Rodrigo Santos Leite, e também ao colega Lycio Shinji Watanabe, Químico do Laboratório de Apoio à Pesquisa Agropecuária (LAPA) da Universidade Estadual de Londrina, por ter nos acompanhado durante a realização destas análises.

Ao Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná, de Londrina, por ter nos fornecido os dados meteorológicos referentes aos períodos de condução do experimento para discussão dos resultados.

Aos membros da banca examinadora, por terem aceitado o convite para participação na defesa e também pelas contribuições para melhoria do trabalho.

A toda equipe da Secretaria do Programa de Pós-graduação, Laboratórios, Estufas e Fazenda Escola, que me auxiliaram quando precisei de alguma informação, documento ou enquanto estive presente realizando minhas atividades.

Ao amigo de Pós-graduação, Edson Amorim, aluno de Mestrado na época, pela ajuda durante a realização de algumas avaliações e também pelo auxílio durante a realização de análises estatísticas e elaboração de gráficos.

A todos os estagiários, alguns atualmente já formados, que tive a oportunidade conhecer, fazer amizade e trabalhar junto durante este período, pois se empenharam durante a execução de várias atividades de campo e laboratório, e muito contribuíram para a conclusão deste projeto. Espero sinceramente, que eu possa ter contribuído com pelo menos um pouco para a formação de cada um de vocês: Eduardo Augusto Matsushima Tavares, Euler Augusto Inêz, Ibrahim Sayed e Silva, Átila Dias Lima, Igor Volpini Colinete, Eduardo Yukio Takahashi, Marcos Vinicius de Aguiar Luz, Guilherme Kudig de Souza, Murilo Rampazzo Favoretto, Marcos Vinicius Knor, Luan Júnior Katsuiti Shibayama, Ana Clara Barros Knor, Vinícius de Losso Machado, Guilherme Antonio Zancheta Funari, Guilherme Alan Lima Zandonadi, Gabriel Pucciarelli Cardoso, Vinícius Chaves de Paiva e Felipe Augusto Vacario.

Por fim, agradeço a todos que não mencionados, porém que de uma forma ou de outra, contribuíram para que este trabalho pudesse ter sido realizado.

Muito obrigado!!!

CAZARIM, Paulo Henrique. **Enriquecimento de sementes de soja com cobalto, molibdênio e níquel:** produção, qualidade das sementes e reflexos no crescimento e na nodulação. 2025. 83 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2025.

## RESUMO

O molibdênio (Mo) é um nutriente essencial à fixação biológica de nitrogênio (FBN) na soja por atuar no metabolismo da nitrogenase na redução de nitrogênio (N) à amônia. Seu fornecimento geralmente é realizado via tratamento de sementes, porém a salinidade do Mo pode prejudicar a viabilidade de bactérias inoculadas e a germinação das sementes. Por isso, pesquisas buscaram fornecê-lo via sementes enriquecidas. Os resultados foram positivos, e melhoria de qualidade fisiológica das sementes também tem sido atribuída a esta prática, porém não há consenso na literatura. Nesta linha de pesquisa, sabendo-se também do papel do nutriente níquel (Ni) e do cobalto (Co) para a FBN, foi levantada a possibilidade de produzir sementes enriquecidas com os três nutrientes. Assim, objetivou-se: 1º) avaliar o efeito de épocas de aplicação foliar e doses de Mo para enriquecimento sobre os componentes de produção e produtividade de sementes da planta-mãe; teores de Mo, óleo e proteína, e qualidade fisiológica das sementes produzidas; e índice de clorofila, nodulação e desempenho fitométrico das plantas oriundas destas sementes; 2º) avaliar o efeito da aplicação foliar de Co e Mo associados a doses de Ni para enriquecimento sobre os componentes de produção e produtividade de sementes da planta-mãe; e teores de elementos químicos, óleo, proteína e ácidos graxos das sementes produzidas. Um experimento foi conduzido nos anos agrícolas 2021/2022 e 2022/2023, em delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições, com dez tratamentos resultantes de um esquema fatorial 2 (com e sem 33,3 g ha<sup>-1</sup> Mo em R1) x 5 (0; 73,5; 147; 220,5; 294 g ha<sup>-1</sup> Mo em R5.2). Outro experimento foi conduzido no ano agrícola 2022/2023, em delineamento inteiramente casualizado, com cinco repetições, com sete tratamentos aplicados em R5.2: controle; CoMo em dose fixa (DF) (40/400 g ha<sup>-1</sup> Co/Mo); CoMo em DF + 20 g ha<sup>-1</sup> Ni; CoMo em DF + 40 g ha<sup>-1</sup> Ni; CoMo em DF + 60 g ha<sup>-1</sup> Ni; CoMo em DF + 80 g ha<sup>-1</sup> Ni; CoMo em DF + 100 g ha<sup>-1</sup> Ni. As aplicações de Mo não prejudicaram o crescimento e desenvolvimento da planta-mãe, assim como a produtividade de sementes. O incremento de Mo nas sementes não foi observado com aplicação em R1, porém foi linear com o aumento das doses em R5.2. O efeito positivo da aplicação de Mo sobre o teor de proteína e qualidade fisiológica das sementes foi variável entre os anos agrícolas. Houve melhoria na nodulação e índice de clorofila, e conseqüentemente, no crescimento e desenvolvimento das plantas oriundas das sementes enriquecidas com a dose de 220,5 g ha<sup>-1</sup> de Mo. Ao utilizar as doses de Co (40 g ha<sup>-1</sup>), Mo (400 g ha<sup>-1</sup>) e Ni (até 100 g ha<sup>-1</sup>) no estágio fenológico R5.2 para enriquecimento de sementes, não houve prejuízo ao crescimento e desenvolvimento da planta-mãe, assim como à produtividade das sementes produzidas. Somado a isso, destaca-se que houve enriquecimento das sementes com os três elementos, principalmente com níquel, e que não houve efeito negativo sobre os teores de óleo, proteína e ácidos graxos.

**Palavras-chave:** *Glycine max* (L.) Merrill; manejo de micronutrientes; produtividade de sementes; qualidade fisiológica; nodulação.

CAZARIM, Paulo Henrique. **Enrichment of soybean seed with cobalt, molybdenum and nickel: production, quality of seed and its effects on growing and nodulation.** 2025. 83 p. Thesis (Doctoral degree in Agronomy) – Londrina State University, Londrina, 2025.

## ABSTRACT

Molybdenum (Mo) is an essential nutrient to biological nitrogen fixation (BNF) in soybean due to act in the nitrogenase metabolism in reduction of nitrogen (N) to ammonia. Its supply is generally made via seed treatment, but Mo salinity might harm the viability of the inoculated bacteria and seed germination. Based on that, studies aimed to provide it through enriched seed. The results were positive, and improvement of seed physiological quality has also been attributed to this practice, but there is no agreement in literature. In this line of study, having knowledge also of the nutrient nickel (Ni) and cobalt (Co) to BNF, it was raised the possibility of producing soybean seed enriched with the three nutrients. So, it was aimed to: 1°) assess the effect of foliar application time and doses of Mo for enrichment over yield components and seed yield of the mother-plant; contents of Mo, oil and protein, and physiological quality of produced seed; and chlorophyll index, nodulation and biometric performance of plants derived of these seed; 2°) assess the effect of Co and Mo foliar application associated to doses of Ni for enrichment over yield components and seed yield of the mother-plant; and contents of chemical elements, oil, protein and fatty acid in the produced seed. It was carried out an experiment in 2021/2022 and 2022/2023 growing seasons, in randomized block design, with four repetitions, with ten treatments resultant of a factorial scheme 2 (with and without 33.3 g ha<sup>-1</sup> Mo in R1) x 5 (0; 73.5; 147; 220.5; 294 g ha<sup>-1</sup> Mo in R5.2). Another experiment was carried out in 2022/2023 growing season, in randomized design, with five repetitions, with seven treatments applied in R5.2: control; CoMo in fixed rate (FR) (40/400 g ha<sup>-1</sup> CoMo); CoMo in FR + 20 g ha<sup>-1</sup> Ni; CoMo in FR + 40 g ha<sup>-1</sup> Ni; CoMo in FR + 60 g ha<sup>-1</sup> Ni; CoMo in FR + 80 g ha<sup>-1</sup> Ni; CoMo in FR + 100 g ha<sup>-1</sup> Ni. The Mo applications did not harm growing and development of the mother-plant, as well as yield of seed. The increment of Mo in seed was not observed with application in R1, although it was linear with increasing doses in R5.2. The positive effect of Mo application over protein content and physiological quality of seed was variable between growing seasons. There was improvement in nodulation and chlorophyll index, and hence, in growing and development of plants derived of seed enriched with the dose 220.5 g ha<sup>-1</sup> Mo. By utilizing the doses of Co (40 g ha<sup>-1</sup>), Mo (400 g ha<sup>-1</sup>) and Ni (up to 100 g ha<sup>-1</sup>) in R5.2 growth stage for seed enrichment, there was no harm over growing and development of the mother-plant, as well as yield of seed produced. Added to that, it is highlighted that there was enrichment of seed with the three elements, mainly with nickel, and that there was no negative effect over oil, protein and fatty acid content.

**Keywords:** *Glycine max* (L.) Merrill; micronutrient management; seed yield; physiological quality; nodulation.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 3-1** - Dados diários de precipitação pluvial, temperaturas máximas, médias e mínimas. S: semeadura; VE: emergência; R1: 50% das plantas com uma flor aberta; Mo: primeira aplicação de molibdênio; R5.1: grãos perceptíveis ao tato a 10% de granação; Mo: segunda aplicação de molibdênio; R7.1: início a 50% de amarelecimento de folhas e vagens; C: colheita. Londrina-PR, anos agrícolas 2021/2022 (A) e 2022/2023 (B). ..... 49
- Figura 3-2** - Produtividade de sementes de soja em função da presença (COM) e ausência (SEM) de aplicação de Mo em R1 e de doses de Mo em R5.2. Londrina-PR, ano agrícola 2022/2023. .... 57
- Figura 3-3** - Quantidade de Mo por quilo de matéria seca (MS) de sementes em função da aplicação de Mo no estágio fenológico R1 (COM e SEM) e de diferentes doses de Mo aplicadas em R5.2. Londrina-PR, anos agrícolas 2021/2022 (A) e 2022/2023 (B). .... 58
- Figura 3-4** - Teor de proteína de sementes de soja em função de doses de Mo aplicadas no estágio fenológico R5.2. Londrina-PR, ano agrícola 2021/2022. .... 59
- Figura 3-5** - Comprimento de parte aérea (CPA) de plântulas oriundas de sementes enriquecidas com doses de Mo aplicadas em R5.2. Londrina-PR, ano agrícola 2021/2022. .... 60
- Figura 3-6** - Avaliação do índice de clorofila falker (FALKER) (A), número de nódulos (NNOD) (B), massa seca de nódulos (MSNOD) (C), diâmetro do caule no florescimento (DC) (D), altura de planta no florescimento (AP) (E), e massa seca de planta no florescimento (MS) (F), para semente sem nenhum tratamento com Mo (S/N), semente enriquecida com 220,5 g ha<sup>-1</sup> Mo (SE), Mo no tratamento de sementes (MoTS), e aplicação de Mo foliar (MoF). Londrina-PR, ano agrícola 2022/2023 ..... 61
- Figura 3-7** - Avaliação do índice de clorofila falker (FALKER) (A), número de nódulos (NNOD) (B), massa seca de nódulos (MSNOD) (C), diâmetro do caule no florescimento (DC) (D), altura de planta no florescimento (AP) (E), e massa seca de planta no florescimento (MS) (F), para semente sem nenhum tratamento com Mo (S/N), semente enriquecida

com 220,5 g ha<sup>-1</sup> Mo (SE), Mo no tratamento de sementes (MoTS), e aplicação de Mo foliar (MoF). Londrina-PR, ano agrícola 2023/2024. .... 61

**Figura 4-1** - Teores dos nutrientes Cu (A), Fe (B), Mo (C), Ni (D), Al (E), Si (F) e Na (G) em sementes de soja em função da aplicação foliar de CoMoNi em R5.2. Londrina-PR, 2023. .... 78

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3-1</b> - Atributos químicos do solo (0-20 cm) na área de condução do experimento onde foram produzidas as sementes. Londrina-PR, anos agrícolas 2021/2022 e 2022/2023 .....	49
<b>Tabela 3-2</b> - Atributos químicos do solo utilizado para o preenchimento dos vasos para o cultivo das sementes enriquecidas. Londrina-PR, anos agrícolas 2021/2022 e 2022/2023.....	53
<b>Tabela 3-3</b> - Análise de variância com o <i>p</i> valor, média geral e coeficiente de variação (CV) das seguintes características avaliadas: número de vagens por planta (VGPL); número de sementes por planta (NSPL); número de sementes por vagem (NSVG); massa de sementes por planta (MSPL); massa de cem sementes (M100); e produtividade de sementes (PROD). Londrina-PR, anos agrícolas 2021/2022 e 2022/2023.....	56
<b>Tabela 3-4</b> - Análise de variância com o <i>p</i> valor, média geral e coeficiente de variação (CV) dos teores de óleo e proteína avaliados. Londrina-PR, anos agrícolas 2021/2022 e 2022/2023 .....	58
<b>Tabela 3-5</b> - Análise de variância com o <i>p</i> valor, média geral e coeficiente de variação (CV) das seguintes características avaliadas: primeira contagem da germinação (PCG); germinação (GERM); envelhecimento acelerado (ENVA); comprimento de parte aérea (CPA); comprimento de raiz (CR); comprimento total (CT); e matéria seca de plântulas (MS). Londrina-PR, anos agrícolas 2021/2022 e 2022/2023.....	59
<b>Tabela 4-1</b> - Atributos químicos do solo utilizado para preenchimento dos vasos utilizados, para o cultivo das plantas que receberam aplicação de CoMoNi em R5.2 visando o enriquecimento de sementes. Londrina-PR, 2022.....	69
<b>Tabela 4-2</b> - Valores do controle e resumo da análise de variância contendo as significâncias ( <i>p</i> valor) para índice de clorofila falker, desempenho fitométrico e de componentes de produção, e produtividade de sementes de soja após aplicação foliar de CoMo e de CoMoNi em R5.2 visando o enriquecimento das sementes durante a produção.	

	Londrina-PR, 2023.....	72
<b>Tabela 4-3</b>	- Valores do controle e resumo da análise de variância contendo as significâncias ( <i>p</i> valor) referentes aos teores de proteína, óleo e ácidos graxos de sementes de soja, após aplicação foliar de CoMo e CoMoNi em R5.2 visando enriquecimento das sementes durante a produção. Londrina-PR, 2023.....	73
<b>Tabela 4-4</b>	- Significância do ajuste da regressão ( <i>p</i> valor) para os elementos químicos analisados em função da aplicação foliar de CoMo e CoMoNi em R5.2 visando o enriquecimento das sementes de soja durante a produção. Londrina-PR, 2023 .....	77

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Aspectos gerais da cultura da soja</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>Nutrição nitrogenada da soja</b> .....	<b>20</b>
<b>2.3</b>	<b>Fixação biológica de nitrogênio</b> .....	<b>21</b>
2.3.1	Cobalto.....	23
2.3.2	Molibdênio.....	24
2.3.3	Níquel.....	25
<b>2.4</b>	<b>Cobalto, molibdênio e níquel no desempenho produtivo</b> .....	<b>26</b>
<b>2.5</b>	<b>Cobalto, molibdênio e níquel na composição de grãos</b> .....	<b>29</b>
<b>2.6</b>	<b>Cobalto, molibdênio e níquel na qualidade de sementes</b> .....	<b>31</b>
<b>2.7</b>	<b>Cobalto, molibdênio e níquel no metabolismo do nitrogênio</b> .....	<b>33</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>37</b>
<b>3</b>	<b>ARTIGO A: PRODUÇÃO, COMPOSIÇÃO, QUALIDADE FISIOLÓGICA E DESEMPENHO DE SEMENTES DE SOJA ENRIQUECIDAS COM MOLIBDÊNIO</b> .....	<b>45</b>
<b>3.1</b>	<b>Resumo</b> .....	<b>45</b>
<b>3.2</b>	<b>Abstract</b> .....	<b>46</b>
<b>3.3</b>	<b>Introdução</b> .....	<b>47</b>
<b>3.4</b>	<b>Material e Métodos</b> .....	<b>48</b>
3.4.1	Descrição do local experimental (produção das sementes) .....	48
3.4.2	Delineamento experimental e tratamentos empregados (produção das sementes).....	49
3.4.3	Implantação e condução (produção das sementes) .....	50
3.4.4	Avaliações realizadas (produção das sementes) .....	51
3.4.5	Descrição do local experimental (cultivo das sementes enriquecidas).....	52
3.4.6	Delineamento experimental e tratamentos empregados (cultivo das sementes enriquecidas) .....	53
3.4.7	Implantação e condução (cultivo das sementes enriquecidas).....	53

3.4.8	Avaliações realizadas no estágio fenológico R2 (cultivo das sementes enriquecidas).....	54
3.4.9	Análise dos dados .....	55
<b>3.5</b>	<b>Resultados e discussão .....</b>	<b>55</b>
<b>3.6</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>63</b>
<b>3.7</b>	<b>Referências.....</b>	<b>63</b>
<b>4</b>	<b>ARTIGO B: PRODUÇÃO E COMPOSIÇÃO DE SEMENTES DE SOJA ENRIQUECIDAS COM COBALTO, MOLIBDÊNIO E NÍQUEL.....</b>	<b>66</b>
<b>4.1</b>	<b>Resumo.....</b>	<b>66</b>
<b>4.2</b>	<b>Abstract.....</b>	<b>67</b>
<b>4.3</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>68</b>
<b>4.4</b>	<b>Material e métodos.....</b>	<b>69</b>
4.4.1	Descrição do local experimental.....	69
4.4.2	Delineamento experimental e tratamentos empregados .....	69
4.4.3	Implantação e condução.....	69
4.4.4	Avaliações realizadas.....	70
4.4.5	Análise dos dados .....	71
<b>4.5</b>	<b>Resultados e discussão .....</b>	<b>71</b>
<b>4.6</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>78</b>
<b>4.7</b>	<b>Referências.....</b>	<b>79</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>82</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é de grande importância para a agricultura brasileira, de modo que seu cultivo está distribuído por várias regiões do território nacional, com variados níveis de produtividade. A produtividade faz referência à produção por área, e seu incremento é o principal foco do setor, visto que contribui para a máxima exploração do ambiente e sustentabilidade do cultivo, e ao mesmo tempo, impõe desafios constantes que pressionam os envolvidos na cadeia produtiva, resultando no desenvolvimento de novas tecnologias.

Estes avanços tecnológicos quando empregados nas práticas de manejo da cultura contribuem para o incremento da produtividade, que em nível nacional tem potencial para ser duplicada segundo estudos recentes. Neste contexto, destaca-se a nutrição de plantas envolvendo os nutrientes cobalto (Co), molibdênio (Mo) e níquel (Ni), os quais apresentam funções específicas na fixação biológica de nitrogênio (FBN), nutriente demandado em maior quantidade pela cultura, na ordem de 80 kg por tonelada de grãos produzida, e que afeta diretamente a produtividade e a qualidade de grãos.

A FBN na soja se dá por meio do estabelecimento de relação simbiótica, na qual as plantas fornecem fotoassimilados às bactérias, e as bactérias fornecem N às plantas. No cultivo da soja, essas bactérias são do gênero *Bradyrhizobium*, caracterizadas pela capacidade de metabolizar o elemento em sua forma molecular ( $N_2$ ), de caráter altamente inerte em função de sua tripla ligação covalente, e o converter em amônia ( $NH_3$ ), forma assimilável pelas plantas e que será utilizada na formação de compostos orgânicos, como aminoácidos e proteínas.

O Co participa do processo de maneira indireta, sendo utilizado pelos microrganismos fixadores como precursor da cobalamina (vitamina  $B_{12}$ ), a qual é essencial para a formação de leghemoglobina, que é uma proteína presente nos nódulos de leguminosas caracterizada por sua alta afinidade pelo oxigênio. A leghemoglobina tem como função o transporte de oxigênio em pequenas quantidades às células dos bacterióides fixadores, para que não haja danos à nitrogenase, que é responsável pela FBN.

O Mo, por meio de molibdo-enzimas, atua na transferência de elétrons na nitrogenase, elétrons estes oriundos da ferredoxina reduzida que serão utilizados para redução da  $N_2$  a duas  $NH_3$ .

O Ni é componente de duas metaloenzimas envolvidas no metabolismo do N, a urease e a hidrogenase. A urease atua na quebra da molécula de ureia que é oriunda dos

ureídeos, os quais contêm o N que foi fixado nos nódulos. Sua quebra dá origem à  $\text{NH}_3$  e gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ). O gás hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) também é resultante do processo e pode diminuir a eficiência do mesmo, entretanto, para que isso não ocorra, a enzima hidrogenase o reprocessa em energia, beneficiando a FBN.

Frente às funções específicas que desempenham no metabolismo do N, os nutrientes Co, Mo e Ni, que são requeridos em menores quantidades, são dignos de estudos objetivando-se supri-los de forma satisfatória, melhorando, conseqüentemente, os processos envolvidos na FBN. Neste sentido, considerando que quando os nutrientes são empregados no tratamento de sementes pode haver problemas de fitotoxicidez às bactérias fixadoras veiculadas via inoculante, o enriquecimento de sementes surge como alternativa.

A prática de enriquecimento de sementes de soja consiste em elevar o teor de determinado nutriente na semente por meio de aplicação foliar na planta-mãe, no início da formação da semente, conceito semelhante ao de biofortificação de alimentos. Deste modo, tendo em conta a translocação do nutriente na planta, há acúmulo do nutriente na semente produzida, o que visa atender a demanda da planta oriunda desta semente. Entretanto, é importante ressaltar a necessidade de se determinar a dose ideal a ser empregada para que não haja fitotoxicidez à planta-mãe, o que prejudicaria a produtividade e se mostraria como um empecilho à adoção pelo produtor de sementes.

Os primeiros trabalhos objetivando o enriquecimento de sementes de soja foram realizados somente com Mo, e mostraram-se eficazes. Ainda, melhoria de qualidade fisiológica das sementes produzidas tem sido atribuída a esta prática, porém há divergências na literatura. Estudos mais recentes buscaram avaliar a possibilidade de enriquecimento com Co e Mo de forma conjunta, apresentando também resultados positivos. Pouco se sabe, porém, sobre a interação de Co e Mo com o Ni, do qual são escassas informações na literatura em função do Ni ter sido o último nutriente classificado como essencial. Além do que, há carência de informações sobre Ni com relação a melhores épocas de aplicação, doses e também de seus efeitos na planta-mãe e nas sementes produzidas.

Desta forma, a presente tese foi dividida em dois artigos. O primeiro teve o objetivo de avaliar o efeito de épocas de aplicação foliar e doses de Mo para enriquecimento sobre os componentes de produção e produtividade de sementes da planta-mãe; teores de Mo, óleo e proteína, e qualidade fisiológica das sementes produzidas; e índice de clorofila, nodulação e desempenho fitométrico das plantas oriundas destas sementes. O segundo teve o objetivo avaliar o efeito da aplicação foliar de Co e Mo associados a doses de Ni para enriquecimento, sobre os componentes de produção e produtividade de sementes da planta-

mãe; e teores de elementos químicos, óleo, proteína e ácidos graxos das sementes produzidas.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 ASPECTOS GERAIS DA CULTURA DA SOJA

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma planta domesticada; de hábito herbáceo; composta de caule ereto com ramificações; de folhas primárias unifolioladas e opostas; de demais folhas trifolioladas alternas dotadas de pecíolo; de inflorescência racemosa com cinco a oito flores; e que possui o fruto na forma de vagem, o qual contém as sementes (FERREIRA *et al.*, 2015). Seu sistema radicular é do tipo pivotante composto por raízes secundárias, e pode apresentar pequenos nódulos resultantes da presença de bactérias do gênero *Bradyrhizobium* (PÉREZ-CERVANTES *et al.*, 2024).

Sua origem é asiática, mais provavelmente da região norte da China, de onde foi disseminada para Europa, norte e sul dos Estados Unidos e América do Sul (LIU *et al.*, 2020). No Brasil, foi introduzida na Bahia em 1882, entretanto, devido sua sensibilidade ao fotoperíodo, não se adaptou. Em 1891, foi cultivada em São Paulo e Rio Grande do Sul, onde apresentou melhor desempenho (SEDIYAMA *et al.*, 2016), o que tornou sua exploração para produção de grãos restrita à região sul do país (FERREIRA *et al.*, 2015).

A disseminação do seu cultivo para as regiões de baixas latitudes se deu graças ao melhoramento genético, o qual introduziu nas linhagens genes que conferem a cultura período juvenil longo (CALVO; KIIHL, 2006). Desde então, a região do bioma cerrado passou a ser considerada a fronteira agrícola do Brasil, e que, com adoção de tecnologias para correção de solo e fornecimento de nutrientes, se tornou a principal região produtora de soja do país (CATTELAN; DALL'AGNOL, 2017).

Este feito na história da soja no Brasil, fortemente impulsionado pelo preço da oleaginosa no mercado externo na década de 70, marca a transição de uma agricultura caracterizada como de subsistência para uma agricultura empresarial, além também de sua contribuição sobre o desenvolvimento econômico e social do país (DALL'AGNOL, 2016). No ano de 2023, segundo estimativa do USDA, a participação das exportações da soja brasileira no mercado mundial aproximou-se de 55% (LOPES, 2023). Aliado a isto, estima-se que para cada 10 hectares de soja, gera-se um emprego direto e um indireto (GAZZONI; DALL'AGNOL, 2021).

Na indústria, os grãos de soja podem ser empregados na fabricação de diversos produtos, a citarem-se os alimentícios para o consumo humano, como farinha, achocolatados, sorvete, leite e óleo; e também na fabricação de utilitários, como combustível

tintas, colas e plásticos. Na agricultura, a planta pode ser destinada a formação de adubo verde, forragem, feno e pastagens (SEDIYAMA *et al.*, 2016), porém, seu principal atrativo reside no fato de que é a cultura que mais produz proteína por hectare em relação a qualquer outro cultivo (CARNEIRO FILHO; COSTA, 2016).

As cultivares de soja apresentam em média de 17 a 22% de óleo, e 37 a 42% de proteína (SEDIYAMA *et al.*, 2016), de modo que não há outra fonte proteica de origem vegetal com melhor custo e benefício para a produção de carnes, ovos, leites e derivados. Portanto, consome-se a soja principalmente de forma indireta, e visto que o consumo de proteína animal continuará crescendo, principalmente em função da melhoria do poder de compra da população, a demanda por soja permanecerá ascendente, alavancando a produção (APROSOJA, 2018).

No ano agrícola 2023/2024, os dados preliminares indicam que foram cultivados no mundo 139,85 milhões de hectares e produzidos 394,73 milhões de toneladas do grão. Os três países com maior área cultivada foram Brasil, Estados Unidos e Argentina, com 45,80, 33,29 e 16,37 milhões de hectares, respectivamente, respondendo estes por 68,2% do total. Estes mesmos países foram também os maiores em produção, os quais apresentaram valores de 153,00, 113,27 e 48,21 milhões de toneladas, respectivamente, respondendo por 79,66% do total (USDA, 2024).

No Brasil, é importante ressaltar que o cultivo da soja está distribuído por todo o seu território, sendo que as regiões centro-oeste, sul e nordeste destacam-se como as três maiores produtoras, com 21,30, 13,37 e 4,40 milhões de hectares, respectivamente. Nestas mesmas regiões, os principais estados produtores são o Mato Grosso, Rio Grande do Sul e Bahia, com 12,37, 6,76 e 1,97 milhões de hectares, respectivamente. O Paraná se apresenta na região sul, com 5,81 milhões de hectares (CONAB, 2024).

Em termos de produtividade, a média nacional encontra-se em 3202 kg ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2024), contudo, resultados obtidos de estudos por parte da pesquisa nacional, pelo Comitê Estratégico Soja Brasil (CESB), apontam que esta média tem potencial para ser duplicada. Estes estudos ao analisarem quais fatores necessitam ser mais bem trabalhados buscando-se preencher as lacunas para o alcance de maiores rendimentos, enfatizam que a prática da adubação e inoculação das sementes com bactérias do gênero *Bradyrhizobium* estão entre os fatores (BATTISTI *et al.*, 2018).

As bactérias do gênero *Bradyrhizobium* são responsáveis pelo processo de FBN na soja e, uma maior eficiência deste processo visando-se explorar o máximo potencial produtivo das cultivares pode ser alcançada por meio do adequado fornecimento dos

nutrientes Co, Mo e Ni em específico, os quais são essenciais à FBN e podem ser fornecidos via sementes, tanto diretamente no momento do tratamento destas, como por meio de suplementação foliar em campos de produção de sementes, objetivando-se o enriquecimento das mesmas com estes elementos.

## 2.2 NUTRIÇÃO NITROGENADA DA SOJA

A adubação no cultivo da soja é trabalhada de acordo com o grau de limitação dos nutrientes e sua disponibilidade no solo (SFREDO, 2008). Dentre os nutrientes, há os minerais, denominados de macro e micronutrientes. Os macronutrientes, representados pelo nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), são absorvidos em  $\text{kg ha}^{-1}$ . Os micronutrientes, representados pelo boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo), zinco (Zn) e níquel (Ni), são requeridos em  $\text{g ha}^{-1}$  (DOMINGOS; LIMA; BRACCINI, 2015).

Dentre os macronutrientes, o N é o requerido em maior quantidade pela soja, como demonstrado por Sfredo (2008). O autor, ao trabalhar com variedades de soja brasileiras, determinou a necessidade de 83 kg N para cada tonelada de grãos produzida. Da mesma forma, em trabalho mais recente conduzido por Bender, Haegele e Below (2015) com variedades de soja americanas, os autores obtiveram o valor de 79 kg N para a mesma quantidade de grãos produzida. Segundo Hungria, Campo e Mendes (2007), caso esta quantidade de N tivesse que ser fornecida por meio de fertilizante nitrogenado, o cultivo da soja seria inviabilizado em função do alto custo, tornando-se viável, por outro lado, a partir da FBN, conferindo competitividade ao produto brasileiro.

Visando estimar a quantia em termos monetários economizada adotando-se a FBN ao invés de fertilizante nitrogenado (ureia) no ano agrícola de 2019/2020, Telles, Nogueira e Hungria (2023) chegaram ao valor de 15,2 bilhões de dólares, ressaltando ao mesmo tempo, a mitigação de 183 milhões de toneladas de gás carbônico liberados na atmosfera, que são resultantes do processo de fabricação e transporte do fertilizante. Os mesmos autores enfatizam desta forma, a FBN como benéfica tanto do ponto de vista econômico como ambiental, visto que contribui para a prática de uma agricultura mais sustentável.

Neste sentido, para que o processo de FBN pelas bactérias do gênero *Bradyrhizobium* tenha a máxima eficiência possível e consiga suprir a demanda de N da soja, já é sabido da necessidade do suprimento adequado dos nutrientes Co e Mo (SFREDO;

OLIVEIRA, 2010). O nutriente Ni também tem sido trabalhado visando potencializar este processo, porém, por tratar-se de uma prática recente, pouco se sabe sobre sua utilização, o que demanda mais informações (LAVRES; FRANCO; CÂMARA, 2017), tanto do seu efeito isolado quanto em associação com os demais nutrientes.

### 2.3 FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO

O processo de FBN consiste na conversão da  $N_2$  à  $NH_3$  por meio de enzimas nitrogenases, e fornece 50% do N biodisponível no planeta. Sem o processo de FBN, sua forma molecular de caráter inerte, a qual compõe 80% da atmosfera, não estaria acessível à vida. Seu caráter inerte é conferido por sua baixa afinidade por prótons e elétrons, alta energia de dissociação e baixa polaridade, fatores que mantêm sua tripla ligação estável (BUSCAGAN; REES, 2019).

As nitrogenases são as únicas enzimas na natureza que podem ativar a tripla ligação da  $N_2$  (SIEGBAHN, 2019). O complexo enzimático é formado por duas metaloproteínas, uma menor (Fe-proteína) e uma maior (MoFe-proteína), e funciona resumidamente da seguinte maneira: a Fe-proteína oxidada recebe um elétron da ferredoxina reduzida; esta por sua vez reduz a MoFe-proteína; e por fim, a MoFe-proteína reduzida reduz a  $N_2$  à  $NH_3$  (TAIZ *et al.*, 2017).

Em nível mais detalhado, a fixação consiste em combinar a  $N_2$  com os íons hidrogênio da água, e trata-se de um processo custoso em termos energéticos. Dezesesseis moléculas de ATP são necessárias para quebrar uma  $N_2$ , e a seguir mais 12 são requeridas para a assimilação e transporte do íon  $NH_4^+$ , totalizando 28 moléculas. Como relação de troca, as plantas em nodulação devem fornecer 12 g de glicose aos bacterióides para se beneficiarem de 1 g de N (SOUMARE *et al.*, 2020).

Observando-se a equação geral da FBN ( $N_2 + 8H^+ + 8e^- + 16Mg-ATP \rightarrow 2NH_3 + H_2 + 16Mg-ADP + 16P_i$ ), nota-se que para cada duas  $NH_3$  formadas é formada também uma de  $H_2$ , ou seja, elétrons que poderiam ser direcionados à redução da  $N_2$  à  $NH_3$  são direcionados à redução de  $H^+$  à  $H_2$  (MAHMUD *et al.*, 2020; TAIZ *et al.*, 2017). Estima-se que aproximadamente 50% dos elétrons sejam utilizados para a redução da  $N_2$ , sendo os outros 50% direcionados à redução do  $H^+$ , portanto, desperdício energético (RUSSEL; ZULFIQAR; HANCOCK, 2020). Para que o desperdício não ocorra, a enzima hidrogenase cliva a  $H_2$  e recicla os elétrons, e assim, na respiração, contribui para o fornecimento de energia à nitrogenase (LINDSTRÖM; MOUSAVI, 2020).

É importante ressaltar, que a FBN é um processo desafiador às bactérias diazotróficas fixadoras, visto que a nitrogenase requer energia da hidrólise de ATP e elétrons de baixo potencial, e é sensível a inativação pelo oxigênio que é um forte aceptor de elétrons, que pode inativar a Fe-proteína e a MoFe-proteína. Assim, para que a FBN ocorra, o ambiente deve ser anaeróbico e com baixo potencial de redução, a fim de proporcionar um eficiente transporte de elétrons à nitrogenase (TAIZ *et al.*, 2017; ALLEMAN; PETERS, 2023).

Entretanto, as bactérias do gênero *Bradyrhizobium* que contém a nitrogenase são aeróbicas, portanto, necessitam do oxigênio para respiração, e para que o oxigênio não seja prejudicial à nitrogenase, o ambiente aeróbico é conferido por uma estrutura denominada de nódulo, que se desenvolve nas raízes das plantas, dentro dos quais se encontram as bactérias fixadoras. O oxigênio é entregue as bactérias através de uma proteína heme denominada de leghemoglobina, que garante níveis suficientes de oxigênio a sua respiração, sem que haja danos à nitrogenase (BURÉN; RUBIO, 2018). Quando ativos, devido à presença da leghemoglobina, os nódulos ao serem seccionados apresentam coloração rósea (ARACHCHIGE *et al.*, 2020).

A soja é a leguminosa que mais se beneficia da FBN por meio de relação simbiótica, tendo no gênero *Bradyrhizobium* suas espécies de bactérias fixadoras (SOUMARE *et al.*, 2020). Na relação simbiótica, as bactérias são adquiridas do ambiente e acomodadas dentro de membranas derivadas da planta, sendo a efetividade da relação dependente de determinantes genéticas por parte de ambos, bactéria e planta. A relação começa com uma sinalização molecular entre as duas partes, na qual a planta secreta moléculas fenólicas na rizosfera, predominantemente flavonóides e isoflavonóides. Estas por sua vez são percebidas pelos rizóbios, que ativam seus genes responsáveis pela nodulação. Estes genes são encarregados pela produção de sinais simbióticos indispensáveis à interação hospedeiro-rizóbio, que ocorrerá em estágios mais avançados do processo de infecção e formação dos nódulos. Tais sinais desencadeiam a divisão celular e formação do meristema do nódulo, e então o rizóbio infecta as raízes da leguminosa através de fissuras, colonização das células da epiderme ou por meio de fios de infecção. Quando acessam a região cortical da raiz, se diferenciam em bacterióides fixadores de N. Já dentro dos nódulos, o rizóbio depende de fontes de carbono oriundas da planta para sustentar seu metabolismo, inclusive a FBN, fontes essas nas formas de ácidos dicarboxílicos, como o malato. Por outro lado, o N produzido pela nitrogenase é entregue às células da planta nas formas de  $\text{NH}_4^+$  ou  $\text{NH}_3$ , via difusão, e ao atingir o citoplasma, é rapidamente assimilado à forma orgânica, aminoácidos, pela ação das enzimas glutamato sintase (GOGAT), e aspartato aminotransferase (MUS *et al.*,

2016).

Ressalta-se, que os nódulos podem ser classificados como indeterminados e determinados. Na soja, está presente o de tipo determinado, caracterizado por se originar na região mais periférica do córtex da raiz, e por não manter seu meristema ativo, apresentando assim tempo de vida limitado (COOPER; SCHERER, 2012). Nos nódulos do tipo determinado, na cultura da soja, o N depois de fixado pela nitrogenase é entregue ao xilema na forma de ureídeos (ácido alantônico e citrulina), e o metabolismo desses ureídeos implica formação de ureia, que pode ser hidrolisada somente na presença da urease, enzima que contém Ni (RODRÍGUEZ-JIMÉNEZ *et al.*, 2016).

### 2.3.1 Cobalto

O Co é um elemento classificado como metal pesado que ocorre naturalmente na crosta terrestre nas formas de cobaltita [CoAsS], erythrita [Co<sub>3</sub>(AsO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>] e esmaltita [CoAs<sub>2</sub>] (ASATI; PICHHODE; NIKHIL, 2016). Sua concentração na crosta se apresenta em média de 25 a 30 mg kg<sup>-1</sup> (MAHEY *et al.*, 2020), e nos solos brasileiros valores considerados normais variam de 2 a 20 mg kg<sup>-1</sup> (FADIGAS *et al.*, 2006). Sua disponibilidade para as plantas aumenta conforme o pH diminui (LIU, 1998).

Quanto a sua absorção radicular, esta se dá na forma de íon Co<sup>+2</sup>, via fluxo de massa, porém, sua translocação acontece somente após a formação de quelatos com ácidos orgânicos (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Trata-se de um elemento móvel no floema, e quando aplicado via foliar, apresenta mobilidade parcial (SFREDO; OLIVEIRA, 2010). Em média, seu conteúdo nas plantas varia de 0,05 a 0,30 mg kg<sup>-1</sup> de matéria seca (MS), e é normalmente maior em leguminosas do que em gramíneas (MARSCHNER, 1995a).

Não há evidências de que o Co tenha algum efeito direto sobre o metabolismo de plantas superiores, entretanto, sabe-se que este elemento apresenta papel ativo na FBN (MARSCHNER, 1995a). Os microrganismos fixadores de N que vivem em simbiose com plantas leguminosas necessitam do Co para a síntese da cobalamina (vitamina B<sub>12</sub>), componente necessário à formação da leghemoglobina nos nódulos radiculares e que está relacionada à eficiência e sucesso da FBN (IPNI, 2012).

Em leguminosas os sintomas da deficiência de Co se relacionam aos da deficiência de N, uma vez que o Co está relacionado à FBN. Para espécies não leguminosas não há sintomas de deficiência conhecidos (IPNI, 2012). Por outro lado, quando em excesso, causa toxidez, refletida por meio de sintomas como folhas cloróticas na parte superior das

plantas e atrofiamento, semelhantes aos da deficiência de Fe, o qual tem sua absorção inibida por elevados níveis de Co (SFREDO; OLIVEIRA, 2010).

As principais fontes de Co são o cloreto de cobalto, sulfato de cobalto e o nitrato de cobalto, sendo que o fornecimento destes pode ser realizado via tratamento de sementes ou, por meio de aplicação foliar na cultura da soja entre os estádios fenológicos V4 e V5. É importante ressaltar que melhores respostas são obtidas para tratamento com Co quando este é aplicado em sementes enriquecidas com Mo (CAMPO; HUNGRIA, 2002). A dose de aplicação pode variar de 2 a 3 g ha<sup>-1</sup> (SFREDO; OLIVEIRA, 2010).

### 2.3.2 Molibdênio

O Mo é um elemento que ocorre nos solos na forma de vários complexos, como molybdenita (MoS<sub>2</sub>), wulfenita (PbMoO<sub>4</sub>) e ferromolybdenita [Fe<sub>2</sub>(MoO<sub>4</sub>)] (NAQIB; JAHAN; 2017). Sua concentração na crosta tem sido estimada em até 1,5 mg kg<sup>-1</sup> (SMEDLEY; KINNIBURGH, 2017), e nos solos brasileiros os teores médios encontrados variam de 0,5 a 5 mg dm<sup>-3</sup> (MALAVOLTA, 1980). Sua disponibilidade para as plantas diminui conforme o pH diminui (NAQIB; JAHAN; 2017).

Quanto a sua absorção radicular, esta se dá na forma de ânions MoO<sub>2</sub><sup>4-</sup>, via fluxo de massa (CAMPO; HUNGRIA, 2002), e é transportado na mesma forma ao invés de complexado, sendo móvel no xilema e no floema. Devido a sua alta mobilidade no floema, a aplicação foliar é um método apropriado, o que facilita a correção da sua deficiência. Sua faixa de deficiência e toxicidade compreende o intervalo entre 0,1 a 1000 µg g<sup>-1</sup> MS (MARSCHNER, 1995b).

O Mo é um micronutriente essencial para as plantas, entretanto, não tão ativo em termos biológicos, mas como co-fator molibídico (Moco), o qual se liga com molibdoenzimas na maioria dos sistemas biológicos. Muitas das enzimas incluem as envolvidas na assimilação do N, como a nitrogenase e nitrato redutase, e também as presentes em bacterióides nos nódulos de leguminosas (RANA *et al.*, 2020). Os nódulos parecem ser um forte dreno de Mo, de modo que o acumulam mais do que o requerido a fim de suportar a FBN (KAISER *et al.*, 2005).

Devido a sua boa mobilidade, seus sintomas de deficiência aparecem na planta toda e incluem os típicos observados para deficiência de N, como plantas atrofiadas e de coloração verde clara, podendo chegar à pálida ou amarelada nos bordos e entre nervuras, e até quequeima em casos mais avançados (PADHI; MISHRA, 2019). Por outro lado, sintomas

de toxicidade são raros (KAISER *et al.*, 2005).

As principais fontes de Mo são o molibdato de sódio, molibdato de amônio, ácido molibídico e o trióxido de molibdênio, e assim como para Co, pode ser aplicado via semente ou, por meio de aplicação foliar entre os estádios fenológicos V4 e V5 na cultura da soja (CAMPO; HUNGRIA, 2002). A dose de aplicação pode variar de 12 a 25 g ha<sup>-1</sup> (SFREDO; OLIVEIRA, 2010).

### 2.3.3 Níquel

O Ni é um metal pesado que ocorre principalmente nas formas minerais, garnierita [(NiMg)<sub>3</sub>SisO<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>] e pentlandita [(NiFe)<sub>9</sub>S<sub>8</sub>] (SACHAN; LAL, 2017). Sua concentração na crosta é estimada em 86 mg kg<sup>-1</sup> (IYAKA, 2011), e em média, nos solos brasileiros, varia de 5 a 35 mg kg<sup>-1</sup> (FADIGAS *et al.*, 2006). Sua solubilidade e mobilidade aumentam conforme a diminuição do pH (IYAKA, 2011).

Quanto a sua absorção radicular, esta se dá na forma de íon Ni<sup>+2</sup>, e também pode ser absorvido pelas folhas (SACHAN; LAL, 2017). Após absorção, 50% do conteúdo fica retido nas raízes, enquanto o restante é transportado para a parte aérea por meio do fluxo transpiratório, via xilema. O elemento apresenta alta mobilidade no xilema e no floema (CHEN; HUANG; LIU, 2009), e seu conteúdo médio nas folhas das plantas varia de 0,05 a 5 mg kg<sup>-1</sup> MS (PRASAD; SHIVAY, 2020).

O Ni é um elemento que foi considerado como micronutriente essencial às plantas recentemente (ESKEW; WELCH; CARY, 1983), apresentando funções biológicas como, por exemplo, constituinte da enzima urease, destacando seu papel no metabolismo do N. A urease hidrolisa a ureia em CO<sub>2</sub> e NH<sub>3</sub>, o que a torna de grande importância em plantas fixadoras de N, como as leguminosas (PRASAD; SHIVAY, 2020). Também é constituinte da hidrogenase, a qual atua na reciclagem do H<sub>2</sub> gerado no processo de FBN em energia (RODAK, 2014).

Sintomas de deficiência são relatados para poucas espécies, entretanto, no caso da soja, se apresentam em função do acúmulo de níveis tóxicos de ureia nos folíolos e necrose na ponta de folhas. Em outras leguminosas os sintomas são expostos na forma de senescência precoce, reduzida absorção de Fe, atraso na nodulação e reduzida eficiência na FBN. Em se tratando de toxidez, há mais sintomas descritos, os quais variam de acordo com as espécies (SACHAN; LAL, 2017).

Como principais fontes de Ni, têm-se o cloreto de níquel, nitrato de níquel,

sulfato de níquel, carbonato de níquel, quelato de níquel e silicato de níquel (NETO, 2017). Entretanto, apesar de variadas fontes, estudos com relação a melhores doses e formas de aplicação ainda são necessários (LEVY *et al.*, 2019).

#### 2.4 COBALTO, MOLIBDÊNIO E NÍQUEL NO DESEMPENHO PRODUTIVO

Em trabalho realizado por Marcondes e Caires (2005), no qual tiveram como um dos objetivos avaliar a produtividade da soja em função do tratamento de sementes com Co (0; 2; 4; e 8 g ha<sup>-1</sup> Co) e Mo (0 e 48 g ha<sup>-1</sup> Mo), não foi observada interação significativa entre os nutrientes. É destacado que o Mo não influenciou a produtividade, e a ausência de resposta foi atribuída possivelmente em função do pH do solo, que se encontrava em 5,2 (CaCl<sub>2</sub>). Entretanto, houve redução linear na produtividade com as doses de Co aplicadas, de modo que acima de 3,4 g ha<sup>-1</sup> Co, a redução foi superior a 5%.

Moraes *et al.* (2008) avaliaram a produtividade da soja em função da aplicação de Co e Mo em diferentes momentos, no tratamento de sementes; no estágio V4; no estágio V6; no estágio R1; e no estágio R3. Para estes tratamentos, utilizaram as doses de 2,5 g ha<sup>-1</sup> Co e 80 g ha<sup>-1</sup> Mo. Em um tratamento combinado, com aplicação no tratamento de sementes e no estágio R3, utilizaram as doses de 2,5 g ha<sup>-1</sup> Co e 20 g ha<sup>-1</sup> Mo nas sementes, e após, 400 g ha<sup>-1</sup> Mo em R3. Os autores não observaram influência dos tratamentos sobre a produtividade.

Após enriquecerem sementes de soja com Mo, com aplicações tendo sido realizadas nos estádios R3 (400 g ha<sup>-1</sup> Mo) e R5 (400 g ha<sup>-1</sup> Mo), e cultivando-se as sementes enriquecidas na ausência e presença de Mo no tratamento de sementes (20 g ha<sup>-1</sup> Mo), não se detectou efeito dos tratamentos sobre a produtividade (POSSENTI; VILLELA; DELQUIQUI, 2009).

Milani *et al.* (2010) trabalharam com enriquecimento de sementes de soja com Mo por meio de aplicação única em R5.2 (400; 600; 800 e 1000 g ha<sup>-1</sup> Mo) e parcelada em R5.2 e R5.4 (duas aplicações de 200, de 300, de 400 e de 500 g ha<sup>-1</sup> Mo), e o controle. Os autores destacam que a aplicação foliar de Mo durante o processo de maturação com o objetivo de acumular o nutriente na semente não interfere na produtividade da soja.

Também avaliando o efeito de Co e Mo na soja, Diesel *et al.* (2010) trabalharam com produto comercial contendo ambos os nutrientes, e empregaram doses de 0; 50; 100; 150; e 200% da dose recomendada pelo fabricante, tendo sido a aplicação realizada via foliar aos 25 dias após a emergência da cultura. Os autores não observaram efeitos

significativos sobre a produtividade.

Em experimento conduzido por Mata *et al.* (2011), no qual os autores avaliaram três doses de Co (0; 2,5; e 5 g ha<sup>-1</sup> Co) e de Mo (0; 21; e 42 g ha<sup>-1</sup> Mo) aplicadas no tratamento de sementes e via foliar aos 30 dias após a emergência da cultura da soja, foi observado que, no tratamento que associou ausência de Co e Mo no tratamento de sementes com aplicação de 5 g ha<sup>-1</sup> Co e 42 g ha<sup>-1</sup> Mo via adubação foliar, houve acréscimo de aproximadamente 74% na produtividade.

Com certa semelhança, Gelain *et al.* (2011) também obtiveram resultado positivo com aplicação de Mo na soja. Os autores buscando avaliar um possível efeito negativo da aplicação de gesso sobre a disponibilidade de Mo testaram possíveis interações entre os fatores. Aplicaram as doses de 0; 1000; 2000 e 3000 kg ha<sup>-1</sup> de gesso anterior à semeadura combinadas a 0; 20; 40 e 60 g ha<sup>-1</sup> Mo no tratamento de sementes, juntamente a 2,16 g ha<sup>-1</sup> Co. Foi observado ausência de interação entre gesso e Mo sobre a produtividade, porém, observaram incremento de 62% na produtividade com a aplicação de 38 g ha<sup>-1</sup> Mo.

Nakao *et al.* (2014) conduziram um experimento e avaliaram a produtividade da soja em função do parcelamento das aplicações de Mo via foliar para enriquecimento de sementes nos estádios R3 e R5.4, nas doses de 0; 200; 400 e 800 g ha<sup>-1</sup> Mo. Os autores observaram efeito dos tratamentos sobre a produtividade, de modo que houve incremento linear do mesmo em função das doses aplicadas, atingindo 486 kg ha<sup>-1</sup> a mais em relação ao controle com o uso da dose de 800 g ha<sup>-1</sup> Mo.

Em trabalho conduzido por Oliveira *et al.* (2017), em que objetivaram enriquecer sementes de soja com aplicação de Mo nas doses de 0; 400 e 800 g ha<sup>-1</sup> Mo parceladas nos estádios fenológicos R3 e R6, os autores não observaram efeito dos tratamentos sobre a massa de mil sementes e sobre a produtividade, e atribuem o resultado obtido ao pouco tempo de atuação do Mo na planta, visto que a soja já estava no estágio reprodutivo.

Objetivando avaliar a produtividade da soja em função de doses de Mo (0; 25; 50; 100; e 200 g ha<sup>-1</sup> Mo) aplicadas via foliar no estágio fenológico V5 da cultura, Bernardes, Júnior e Araújo (2019) realizaram um experimento. Os autores discutem que, apesar de terem trabalhado com solo com alto teor de areia, no qual a probabilidade de resposta é maior, não foi observado influência dos tratamentos, ressaltando que tal fato se deva possivelmente ao pH do solo ter sido corrigido anterior à instalação do experimento por meio de calagem, o que pode ter aumentado a disponibilidade de Mo às plantas.

Referente a Ni, alguns trabalhos constam na literatura, como o conduzido

por Alovisi *et al.* (2011). Os autores testaram por meio de aplicação foliar aos 20 dias após a emergência da cultura da soja as doses de 0; 22; 44; 88 e 132 g ha<sup>-1</sup> Ni, utilizando como fonte o sulfato de níquel, e observaram incremento no teor foliar do elemento conforme aumento das doses, tendo o valor quase quadruplicado. Entretanto, para produtividade não foi observado diferença significativa.

Resultado positivo sobre a produtividade da soja foi obtido por Barcelos *et al.* (2017). Os autores aplicaram as doses de 0; 10; 20; 40; 60; 80 e 100 g ha<sup>-1</sup> Ni no estágio fenológico R1, adotando-se como fonte sulfato de níquel, na presença e ausência de fungicida, que tem como ingrediente ativo a piraclostrobina. Foi observado aumento no número de vagens por planta e na produtividade até a dose de 20 g ha<sup>-1</sup> Ni, porém os resultados foram inferiores na presença de piraclostrobina.

Trabalhando também com as doses de 0; 10; 20; 40; 60; 80 e 100 g ha<sup>-1</sup> Ni no estágio fenológico R1, adotando-se como fonte sulfato de níquel, na presença e ausência de fungicida, que também tem como ingrediente ativo a piraclostrobina, Barcelos *et al.* (2018) observaram aumento no número de vagens por planta em função da aplicação, porém não foi observado efeito positivo sobre a produtividade. Os autores destacam que a produtividade respondeu somente à aplicação de fungicida.

Oliveira *et al.* (2018) trabalharam com N, S, Mo e Ni (não citada a fonte – 17,4 g ha<sup>-1</sup> Ni), aplicados via foliar, de maneira isolada, vinte e cinco dias após a emergência da cultura da soja. Os autores destacam que não houve influência dos tratamentos sobre a produtividade.

Em experimento conduzido por Freitas *et al.* (2018), avaliando a resposta de dezessete genótipos de soja a duas doses de Ni (sulfato de níquel – 0 e 1 kg ha<sup>-1</sup> Ni) em condições de campo, foi observado interação entre doses e genótipos, de modo que na presença de Ni, obtiveram incremento na produtividade de até 1502 kg ha<sup>-1</sup>.

Carlim *et al.* (2019) trabalharam com Ni na ausência de Mo (cloreto de níquel - 23,2 g ha<sup>-1</sup>) e na presença de Mo (molibdato de sódio - 31,2 g ha<sup>-1</sup>), via aplicação foliar, 25 dias após a emergência da cultura da soja, e observaram que os tratamentos com Ni na ausência de Mo, ou na presença de Mo, proporcionaram maiores número de vagens por planta e produtividade.

Tendo como um dos objetivos avaliar a produtividade da soja em duas localidades diferentes, uma com solo areno-argiloso e outra com solo franco-arenoso, em resposta a diferentes formas de aplicação de Ni (tratamento de sementes, aplicação foliar em V3/V4, e via solo), Rodak *et al.* (2024) realizaram um experimento. Os autores empregaram

seis tratamentos: controle; tratamento de semente; aplicação foliar; fertilização via solo; fertilização via solo + aplicação foliar; e tratamento de semente + aplicação foliar. Na localidade de solo areno-argiloso, dois tratamentos se destacaram, sendo a fertilização via solo + aplicação foliar e o tratamento de semente + aplicação foliar, que resultaram em incremento de produtividade de 653 kg ha<sup>-1</sup>. Na localidade de solo franco-arenoso, somente o tratamento de semente + aplicação foliar se destacou, com incremento de produtividade de 1161 kg ha<sup>-1</sup>.

## 2.5 COBALTO, MOLIBDÊNIO E NÍQUEL NA COMPOSIÇÃO DE GRÃOS

A quantidade de micronutrientes extraída pelos grãos de soja segue a seguinte ordem decrescente, em mg kg<sup>-1</sup>: Cl (237) > Fe (70) > Zn (40) > Mn (30) > B (20) > Cu (10) > Mo (5). Porém, quando se considera o total exportado, a ordem decrescente se dá da seguinte forma, em %: Mo (71) > Zn (66) > Cl (46) > Cu (38) > B (26) > Mn (23) > Fe (15). Como evidenciado, o Mo é o micronutriente extraído em menor quantidade, porém, o mais exportado em termos percentuais (SFREDO, 2008). Desta forma, seu fornecimento é de grande importância nos sistemas de produção de soja que buscam a obtenção de altas produtividades.

Campo *et al.* (2009) destacam que o sistema intensivo de cultivo da soja no Brasil tem depreciado o conteúdo de Mo nos solos, o que tem levado a freqüentes respostas a sua aplicação. Os mesmos autores buscando enriquecer seu teor nas sementes por meio de aplicação foliar de modo a substituir sua aplicação direta nas sementes, em função de sua salinidade, observaram que é uma alternativa viável, parcelando-se 800 g ha<sup>-1</sup> Mo entre os estádios R3 e R5, com intervalo de 10 dias, por meio das quais alcançaram incremento de até 3000% do seu teor nas sementes produzidas.

Em experimento realizado por Milani *et al.* (2010) avaliando enriquecimento de sementes de soja com Mo, as doses de 0; 400; 600; 800 e 1000 g ha<sup>-1</sup> Mo foram aplicadas de forma única no estágio fenológico R5.2, ou parceladas em R5.2 e R5.4. Os autores observaram resultado significativo para doses, de modo que o incremento do teor do elemento nas sementes apresentou comportamento linear, porém ressaltam que o resultado obtido independe de a aplicação ter sido realizada em dose única ou parcelada.

Possenti e Villela (2010) trabalharam com enriquecimento em sementes de soja com Mo, parcelando 800 g ha<sup>-1</sup> Mo em duas aplicações foliares, nos estádios fenológicos R3 e R5, e observaram incremento de 0,21 para 33,84 mg kg<sup>-1</sup> em seu teor na semente

produzida, considerando a média de três cultivares. Os autores destacam que antes da semeadura as sementes das cultivares testadas se apresentavam com teores de Mo abaixo do limite de detecção do teste. Ainda, destacam que o enriquecimento não transferiu Mo para a semente da próxima geração em teores detectáveis.

Em vista de já demonstrada a possibilidade do enriquecimento de sementes de soja com Mo, porém frente à ausência de estudos do mesmo associado a Co, um experimento foi realizado por Gruberger (2016). O autor trabalhou com as doses de 0; 10; 20 e 30 g ha<sup>-1</sup> Co associadas a 800 g ha<sup>-1</sup> Mo, aplicadas via foliar e via solo no estágio fenológico R5.4, e observou incremento linear no teor de Co em função do aumento das doses, com maiores resultados obtidos para aplicação foliar, concluindo ser viável a aplicação dos elementos em associação.

Cortese *et al.* (2019) realizaram um trabalho com o objetivo de avaliar o incremento de Co e Mo em campo de produção de sementes de soja, via aplicação foliar parcelada em duas vezes, nos estádios fenológicos R3 e R5.1; R3 e R5.4; e R5.1 e R5.4, com doses das duas aplicações totalizando 0; 40 e 60 g ha<sup>-1</sup> Co e, 0; 400 e 600 g ha<sup>-1</sup> Mo. Os autores observaram que, para Co, houve incremento de seu teor nas sementes de 1,0 para 1,3 mg kg<sup>-1</sup> com as doses de 40 e 60 g ha<sup>-1</sup> Co. Para Mo, houve incremento de seu teor nas sementes de 1,0 para 13,5 mg kg<sup>-1</sup>, com a dose de 400 g ha<sup>-1</sup> Mo.

Em se tratando de Ni, em trabalho desenvolvido por Eskew *et al.* (1984), no qual os autores cultivaram plantas de soja oriundas de sementes de primeira geração com teores de Ni por semente menor ou igual a 2,5 ng, 13 ng e 160 ng, os autores observaram que o rendimento de sementes tendeu ao aumento, apesar da ausência de significância, em função de maiores teores do elemento nas sementes.

Kutman *et al.* (2013) observaram que o teor de Ni nas sementes teve efeito significativo sobre a atividade da urease, a qual aumentou conforme o aumento na quantidade de Ni nas sementes. Os autores destacam que fontes externas de Ni apresentaram mínima significância sobre a atividade da enzima, porém, estas certamente não poderiam substituir a reserva das sementes durante o processo germinativo, o que pode prejudicar a utilização de reservas de N nas sementes em função da baixa atividade ureolítica.

Em experimento conduzido por Lavres, Franco e Câmara (2016), a aplicação de Ni no tratamento de sementes provou ser alternativa eficiente para enriquecer o teor do elemento nas mesmas. Testando as doses de 0; 45; 90; 135; 180; 360 e 540 mg kg<sup>-1</sup> Ni nas sementes, correspondentes a 0; 2,5; 5,0; 7,5; 10; 20 e 30 g ha<sup>-1</sup> Ni, respectivamente, os autores observaram que o acúmulo de Ni nas mesmas respondeu de forma quadrática, com

máximo sendo atingido na dose de  $360 \text{ mg kg}^{-1}$  Ni, o que representou 262% de incremento. Destacam, porém, que a prática deveria ser considerada principalmente em solos com baixos teores, nos quais a probabilidade de resposta pode ser positiva.

Buscando enriquecer sementes de soja com Ni e Mo, um trabalho foi realizado por Silva (2021). O autor trabalhou com Ni ( $1,8 \text{ g ha}^{-1}$  Ni), Co ( $0,9 \text{ g ha}^{-1}$  Co) e Mo ( $18,1 \text{ g ha}^{-1}$  Mo) no tratamento de sementes, em associação à aplicação foliar de Ni em V5 ( $10$  e  $20 \text{ g ha}^{-1}$  Ni) e de Mo em R5.1 ( $20$  e  $40 \text{ g ha}^{-1}$  Mo). Foi observado que nenhum dos tratamentos empregados influenciou o teor de Ni nas sementes, ao passo que o teor de Mo foi aumentado, tendo a dose de  $40 \text{ g ha}^{-1}$  Mo proporcionado seu maior acúmulo nas sementes.

## 2.6 COBALTO, MOLIBDÊNIO E NÍQUEL NA QUALIDADE DE SEMENTES

A qualidade de sementes engloba os atributos genético, físico, fisiológico e sanitário, entretanto, apesar de os quatro apresentarem importância equivalente, o potencial fisiológico tem recebido maior atenção da pesquisa, possivelmente em função de sua contribuição sobre o rápido e uniforme estabelecimento do estande, momento em que o produtor consegue verificar “in loco” o desempenho das sementes adquiridas (MARCOS FILHO, 2013).

Neste sentido, a aquisição de sementes de alto potencial fisiológico se justifica simplesmente pelo fato de assegurar o ideal estabelecimento do estande inicial de plantas, além também de ganhos adicionais já relatados, como incremento em produtividade (FRANÇA-NETO *et al.*, 2016). É importante ressaltar, que dentre os vários fatores que contribuem para o potencial fisiológico, ressalta-se a nutrição da planta-mãe (BAREKE, 2018), podendo-se destacar neste caso os micronutrientes, os quais quando translocados de forma eficiente para as sementes melhoram sua vitalidade, o que permite boa emergência e crescimento vigoroso de plântulas (DIMKPA; BINDRABAN, 2016).

Visando avaliar a qualidade fisiológica de sementes de soja após aplicação foliar de Mo em aplicação única em R5.2 ( $400$ ;  $600$ ;  $800$  e  $1000 \text{ g ha}^{-1}$  Mo) e parcelada em R5.2 e R5.4 (duas aplicações de  $200$ , de  $300$ , de  $400$  e de  $500 \text{ g ha}^{-1}$  Mo), além de um tratamento controle, Milani *et al.* (2010) não observaram resultados significativos para nenhuma das características que avaliaram, destacando os autores que o teor do elemento não interfere na qualidade das sementes.

A avaliação da qualidade de sementes após enriquecimento com Mo foi avaliada por Possenti e Villela (2010). Os autores aplicaram de forma parcelada em R3 e R5,

a dose de 800 g ha<sup>-1</sup> Mo, e dentre os testes que adotaram, destacam que a qualidade fisiológica das sementes não se mostrou superior em nenhum deles, porém, destacam que os resultados obtidos não esgotam o assunto o qual se propuseram a estudar.

Nakao *et al.* (2014) trabalharam com enriquecimento de sementes de soja utilizando as doses de 0; 200; 400 e 800 g ha<sup>-1</sup> Mo, parceladas em duas aplicações, nos estádios fenológicos R3 e R5.4. Os autores observaram significância para a qualidade fisiológica de sementes, de modo que para o teste de germinação obtiveram incremento de 11% em relação à testemunha com a aplicação de 800 g ha<sup>-1</sup> Mo, e para o teste de comprimento de plântulas, observaram efeito linear crescente.

Em experimento conduzido por Cortese *et al.* (2019), no qual foi avaliado aplicação foliar de Co e Mo parcelada nos estádios fenológicos R3 e R5.1; R3 e R5.4; e R5.1 e R5.4, com doses das duas aplicações totalizando 0; 40 e 60 g ha<sup>-1</sup> Co e, 0; 400 e 600 g ha<sup>-1</sup> Mo, não foi observado diferença significativa para a porcentagem de germinação das sementes produzidas.

Cardoso *et al.* (2021) realizaram um trabalho visando enriquecer sementes de soja com as doses de 0; 400 e 800 g ha<sup>-1</sup> Mo; parcelando as doses nos estádios fenológicos R3 e R5. Os autores ao analisarem as sementes após a colheita observaram incremento linear de Mo nas sementes conforme o aumento das doses, e destacam que as sementes enriquecidas apresentaram maior percentual de germinação, com as doses de 0; 400 e 800 g ha<sup>-1</sup> Mo resultando em 62, 71 e 71% de germinação, respectivamente.

Um trabalho foi conduzido por Carmo Filho (2022), utilizando uma formulação composta de Co (1,89%), Mo (22,0%) e Ni (1,0%) em doses crescentes no tratamento de semente (0; 2; 4; 6 e 8 mL kg<sup>-1</sup>), tendo como um dos objetivos avaliar o potencial fisiológico de sementes de alto e baixo vigor após o tratamento. Observou-se que o potencial fisiológico foi afetado negativamente com o aumento das doses aplicadas, em função do efeito fitotóxico, sendo o efeito mais pronunciado nas sementes de menor vigor. Neste sentido, ressalta a importância de se adotar sementes de maior vigor, cabendo destacar também, a de se buscar outras formas para o fornecimento destes elementos, além do tratamento de sementes.

Após aplicarem as doses de 0, 400, 800 e 1600 g ha<sup>-1</sup> Mo entre os estádios fenológicos R1 e R2, tendo como um dos objetivos avaliar a qualidade fisiológica das sementes de soja produzidas, Cardoso *et al.* (2024) destacam que, considerando a média dos experimentos que realizaram, houve efeito positivo sobre os testes de protrusão da raiz, envelhecimento acelerado e também comprimento de plântulas. Para germinação, não

observaram efeito significativo apesar do padrão de resposta, e destacam que a máxima germinação foi obtida aplicando-se a dose de 1108,3 g ha<sup>-1</sup> Mo.

## 2.7 COBALTO, MOLIBDÊNIO E NÍQUEL NO METABOLISMO DO NITROGÊNIO

Em trabalho realizado por Marcondes e Caires (2005), no qual tiveram como um dos objetivos avaliar na cultura da soja a nodulação, absorção e concentração de N nas folhas e nos grãos, em função do tratamento de sementes com Co (0; 2; 4; e 8 g ha<sup>-1</sup> Co) e Mo (0 e 48 g ha<sup>-1</sup> Mo), não foram observadas significâncias em função dos diferentes tratamentos.

Milani *et al.* (2008) enriqueceram sementes de soja com Mo (0; 400; 600; 800; e 1000 g ha<sup>-1</sup> Mo) com aplicação tendo sido realizada de forma única em R5.2 e parcelada em R5.2 e R5.4, e também realizaram aplicação do mesmo via tratamento de sementes na dosagem do produto comercial, para comparação com as sementes enriquecidas. Os autores observaram que a aplicação no tratamento de sementes prejudica a nodulação, de modo que para sementes enriquecidas, tal efeito não foi observado. Observaram também, que plantas oriundas de sementes enriquecidas possuem maior acúmulo de N nas folhas.

Três doses de Co (0; 2,5; e 5 g ha<sup>-1</sup> Co) e três de Mo (0; 21; e 42 g ha<sup>-1</sup> Mo) foram aplicadas no tratamento de sementes e via foliar aos 30 dias após a emergência da cultura da soja em pesquisa desenvolvida por Mata *et al.* (2011). Uma maior nodulação foi observada no experimento para a combinação de 5 g ha<sup>-1</sup> Co com 42 g ha<sup>-1</sup> Mo, na ausência de aplicação via tratamento de sementes. Com o incremento das doses no tratamento de sementes, houve diminuição no número de nódulos.

Ao avaliar possíveis efeitos negativos resultantes da aplicação de gesso sobre a disponibilidade de Mo, Gelain *et al.* (2011) testaram as doses de 0; 1000; 2000 e 3000 kg ha<sup>-1</sup> de gesso anterior à semeadura combinadas a 0; 20; 40 e 60 g ha<sup>-1</sup> Mo no tratamento de sementes, juntamente a 2,16 g ha<sup>-1</sup> Co. Os autores não observaram interação entre os fatores testados, entretanto, observaram redução linear no número de nódulos com aumento da dose de Mo, porém, estes se mantiveram em quantidade dentro do ideal. Em contrapartida, detectaram aumento de 6% no teor de N foliar com a dose de 34 g ha<sup>-1</sup> Mo.

Cinco doses de Mo (0; 25; 50; 100; e 200 g ha<sup>-1</sup> Mo) foram aplicadas via foliar no estágio fenológico V5 da cultura da soja em experimento conduzido por Bernardes, Júnior e Araújo (2019). Os autores não observaram efeito dos tratamentos sobre o número e a massa seca de nódulos, e atribuem tal resultado em decorrência de ter sido realizada correção

da acidez do solo anterior à instalação do experimento, o que pode ter aumentado a disponibilidade do elemento.

Foi observado por Eskew *et al.* (1983), que plantas de soja deficientes em Ni acumularam teores tóxicos de ureia em lesões necróticas na ponta dos folíolos, independentemente de terem sido fertilizadas com N inorgânico ou se dependeram somente da FBN, além de terem detectado também, atraso na nodulação e no crescimento inicial das plantas. Os autores destacam que o Ni é essencial para o metabolismo do N na soja, independentemente de ser fornecido via nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ),  $\text{NH}_4^+$  ou por meio de FBN.

Lavres, Franco e Câmara (2016) conduziram um experimento em vasos utilizando sulfato de níquel nas doses de 0; 45; 90; 135; 180; 360 e 540  $\text{mg kg}^{-1}$  Ni, no tratamento de sementes, correspondentes a 0; 2,5; 5,0; 7,5; 10; 20 e 30  $\text{g ha}^{-1}$  Ni, respectivamente. Os autores observaram que a dose de 45  $\text{mg kg}^{-1}$  Ni aumentou a FBN em 12%, e destacam ainda, que a aplicação via tratamento de sementes é uma estratégia viável, uma vez que pode ser incorporada a Co e Mo.

Dois teores de saturação por cátions (50 e 70%) no solo e cinco doses de Ni (0; 0,1; 0,5; 1,0 e 10  $\text{mg dm}^{-3}$  Ni no solo) foram testados por Macedo *et al.* (2016) em experimento em casa de vegetação. Os autores observaram que a atividade da urease foi maior na saturação de 50% comparado a de 70%, sendo ainda observado de 20 a 30% a mais de atividade da enzima nas folhas em função das aplicações de Ni.

Em trabalho realizado por Reis *et al.* (2017), contendo em solução nutritiva 0,00; 0,05; 0,1; 0,5; 10 e 20  $\mu\text{mol L}^{-1}$  Ni, foi observado que a atividade da enzima nitrato redutase aumentou em 84%, comparado ao controle, na presença de 0,05  $\mu\text{mol L}^{-1}$  Ni em solução nutritiva, decaindo com o aumento do teor. Por outro lado, foi observado que a atividade da urease aumentou até 300%, comparado ao controle, na presença de 20  $\mu\text{mol L}^{-1}$  Ni. Os autores discutem, com base em outros autores, que plantas de soja com teores adequados de Ni apresentam maiores concentrações de  $\text{NO}_3^-$ , ureia, proteína e aminoácidos livres, o que leva a maior atividade das enzimas responsáveis pela assimilação de N.

Tendo como um dos objetivos avaliar a atividade da urease, o teor de N foliar e de clorofila em função da aplicação de Ni no estágio fenológico R1, adotando-se como fonte sulfato de níquel, as doses de 0; 10; 20; 40; 60; 80 e 100  $\text{g ha}^{-1}$  Ni foram testadas por Barcelos *et al.* (2017), na presença e ausência de fungicida, que tem como ingrediente ativo a piraclostrobina. Observou-se aumento na atividade da urease até a dose de 20  $\text{g ha}^{-1}$  Ni, com pico entre 20 e 40  $\text{g ha}^{-1}$  Ni. Também foi observado aumento linear no teor de N foliar e no teor de clorofila (índice SPAD) conforme o aumento nas doses de Ni, independentemente da

aplicação de fungicida.

A atividade da urease e a concentração de ureia em folhas de soja foram avaliadas por Barcelos *et al.* (2018). No trabalho, foram testadas as doses de 0; 10; 20; 40; 60; 80 e 100 g ha<sup>-1</sup> Ni no estágio fenológico R1, adotando-se como fonte sulfato de níquel, na presença e ausência de fungicida, que também tem como ingrediente ativo a piraclostrobina. Foi observado que a aplicação de Ni entre 10 e 40 g ha<sup>-1</sup> Ni, na presença ou ausência de fungicida, aumentou a atividade da urease, ao passo que a concentração de ureia na folha diminuiu.

Levy *et al.* (2019) avaliaram o efeito de doses crescentes de Ni (cloreto de níquel – 0; 0,25; 0,50 e 1 mg kg<sup>-1</sup> Ni) aplicados diretamente em dois tipos de solo (arenoso e argiloso) em casa de vegetação, na cultura da soja. Os autores observaram que a adição de Ni aumentou a atividade da enzima urease nas plantas, porém, esta foi afetada pelos diferentes tipos de solo. A maior atividade da enzima se deu no solo arenoso, na dose de 1 mg kg<sup>-1</sup> Ni, e a maior MS se deu na dose de 0,25 mg kg<sup>-1</sup> Ni, com aumento de 25% no mesmo solo. Destacam, porém, que não houve correlação entre a atividade da enzima e o acúmulo de biomassa.

Tendo como um dos objetivos avaliar o efeito da fertilização com Ni sobre o metabolismo do N (ureia) e a eficiência da FBN em um genótipo de soja responsivo a Ni, um trabalho foi conduzido por Freitas *et al.* (2019). Os autores testaram seis doses de Ni (0,00; 0,25; 0,50; 1,00; 3,00 e 9,00 mg kg<sup>-1</sup> Ni), tendo como fonte sulfato de níquel, aplicadas via solo em vasos em casa de vegetação. Foi observado melhoria no metabolismo do N (ureia) até a dose de 3,00 mg kg<sup>-1</sup> Ni, destacando aumento na atividade da urease, diminuição na concentração de ureia e aumento na concentração de NH<sub>3</sub> nas folhas. Os autores também observaram melhoria na FBN até a mesma dose, destacando aumento na atividade da nitrogenase, na concentração de ureídeos, no número e na massa de nódulos, e também na intensidade da coloração rósea dos nódulos.

Einhardt *et al.* (2021) realizaram um trabalho com o objetivo de avaliar a dose máxima de Ni que não causasse toxicidade ao tecido foliar da soja, e um dos parâmetros que avaliaram foi o teor de clorofila. No trabalho, foram aplicadas em V4, utilizando-se sulfato de níquel como fonte, as doses de 0; 30; 60; 120 e 240 g ha<sup>-1</sup> Ni. Os autores observaram que até a dose de 60 g ha<sup>-1</sup> Ni não houve sintomas de toxicidade, o que foi observado com as doses superiores. Explicando esta resposta, atribuem a diminuição no teor de clorofila em função do distúrbio na síntese dos pigmentos e também, aumento na sua degradação.

Buscando melhor entender a atuação do Ni na soja, um dos objetivos de Rodak *et al.* (2024) foi avaliar a eficiência da FBN e do metabolismo do N na cultura ao empregarem seis tratamentos: controle; tratamento de semente; aplicação foliar em V3/V4; fertilização via solo; fertilização via solo + aplicação foliar em V3/V4; e tratamento de semente + aplicação foliar em V3/V4. Foi observado que todos os tratamentos foram superiores ao controle ao avaliarem o teor de clorofila, fotossíntese, atividade da nitrogenase, atividade da urease, concentração de ureídeos e FBN. Para massa seca de parte aérea, os tratamentos fertilização via solo; fertilização via solo + aplicação foliar em V3/V4; e tratamento de semente + aplicação foliar em V3/V4 foram superiores.

Oliveira *et al.* (2024) trabalharam com sementes de soja contendo Ni em teor deficitário e suficiente, cultivadas na ausência e na presença de Ni em solução nutritiva, com e sem remoção dos cotilédones. Após estabelecimento das plantas, em V4, a atividade da urease foi uma das avaliações que realizaram. Os resultados demonstraram que plantas oriundas de sementes com teor suficiente, na ausência de Ni em solução nutritiva, tanto com remoção como sem remoção dos cotilédones, apresentaram maior atividade da enzima. Também observaram que na presença de solução nutritiva, a atividade da enzima aumentou, tanto para com como sem remoção dos cotilédones, sendo que com a remoção dos cotilédones, a semente com teor suficiente foi superior, ao passo que sem remoção, a semente com teor deficitário foi superior. Discutindo os resultados, destacam a importância dos cotilédones como uma importante reserva de Ni, assim como de todos nutrientes.

## REFERÊNCIAS

- ALLEMAN, A. B.; PETERS, J. W. Mechanisms for generating low potential electrons across the metabolic diversity of nitrogen-fixing bacteria. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 89, n. 5, p. 1-20, 2023.
- ALOVISI, A. M. T.; MAGRI, J.; DUTRA, J. E.; MAGRI, E.; SANTOS, M. J. G. ALOVISI, A. A. Adubação foliar com sulfato de níquel na cultura da soja. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**. v. 15, n. 2, p. 25-32, 2011.
- APROSOJA. ASSOCIAÇÃO DOS PRODUTORES DE SOJA. **A soja: uso da soja**. 2018. Disponível em: <<https://aprosojabrasil.com.br/a-soja/>>. Acesso em: 08/06/2021.
- ARACHCHIGE, P. S. P.; ROSSO, L. H. M.; HANSEL, F. D.; RAMUNDO, B.; TORRES, A. R.; ASEBEDO, R.; CIAMPITTI, I. A.; JAGADISH, S. V. K. Temporal biological nitrogen fixation patten in soybean inoculated with *Bradyrhizobium*. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v. 3. 10 p., 2020.
- ASATI, A.; PICHHODE, M.; NIKHIL, K. Effect of heavy metals on plants: an overview. **International Journal of Application or Innovation in Engineering and Management**, v. 5, n. 3, p. 56-66, 2016.
- BARCELOS, J. P. Q.; OSÓRIO, 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 status, urease activity and physiological quality of soybean seeds. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 2, p. 184-192, 2017.
- 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 (*Microspheera diffusa*) in soybean plants. **Plant pathology**, v. 76, p. 1502-1513, 2018.
- BAREKE, T. Biology of seed development and germination physiology. **Advances in Plants and Agricultural Research**, v. 8, n. 4, p.336-346, 2018.
- BATTISTI, R; SENTELHAS, P. C.; PASCOALINO, J. A. L.; SAKO, H.; DE SÁ DANTAS, J. P.; MORAES, M. F. Soybean yield gap in the areas of yield contest in Brazil. **International Journal of Plant Production**, v. 12, p. 159-168, 2018.
- BENDER, R. R.; HAEGELE, J. W.; BELOW, F. E. Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern soybean varieties. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 2, p. 563-573, 2015.
- BERNARDES, J. V. S.; JÚNIOR, V. O.; ARAUJO, J. P. N. Aplicação foliar de molibdênio não influencia a produtividade de soja em solo com acidez corrigida. **Revista Inova Ciência & Tecnologia**, v. 5, n. 2, p. 12-17, 2019.
- BURÉN, S.; RUBIO, L. M. State of the art in eukaryotic nitrogenase engineering. **FEMS Microbiology Letters**, v. 365, p. 1-9, 2018.

BUSCAGAN, T. M.; REES, D. C. Rethinking the nitrogenase mechanism: activating the active site. **Joule**, v. 3, p. 2662-2678, 2019.

CALVO, E. S.; KIIHL, R. A. S. Melhoramento genético: de onde partimos e para onde vamos. **Revista Visão Agrícola**, n. 5, 4 p, 2006.

CAMPO, J. C.; ARAÚJO, R. S.; HUNGRIA, M. Molybdenum-enriched soybean seeds enhance N accumulation, seed yield, and seed protein content in Brazil. **Field Crops Research**, v. 110, p. 219-224, 2009.

CAMPO, R. J.; HUNGRIA, M. **Importância dos micronutrientes na fixação biológica do N<sub>2</sub>**. Londrina, PR: Embrapa Soja, 2002. 4 p.

CARDOSO, B. M.; DAMETO, L. S.; DELFIM, J.; MORAES, L. A. C.; LAZARINI, E.; MOREIRA, A. Soybean seed quality: the impact of foliar application with molybdenum and nickel. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 45, n. 5, p. 1463-1478, 2024.

CARDOSO, B. M.; LAZARINI, E.; MOREIRA, A.; MORAES, L. A. C.; SANTOS, F. L. D.; DAMETO, L. S. Effect of foliar molybdenum application on seed quality of soybean cultivars. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 52, n. 6, p. 666-672, 2021.

CARLIM, E. L.; MEERT, L.; REIS, B.; ALLEMAN, L. E. Fertilization with nickel and molybdenum in soybean: effect on agronomic characteristics and grain quality. **Terra Latinoamericana**, v. 37, p. 217-222, 2019.

CARMO FILHO, Abimael dos Santos. **Tratamento de sementes de soja com cobalto, molibdênio e níquel**: efeitos no potencial fisiológico das sementes, nodulação e desempenho das plantas. 2022. 76 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia). Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2022.

CARNEIRO FILHO, A.; COSTA, K. **A expansão da soja no cerrado**: caminhos para ocupação territorial, uso do solo e produção sustentável. São Paulo, SP: Agroicone, 2016.

CATTELAN, A. J.; DALL'AGNOL, A. The rapid soybean growth in Brazil. **Oilseeds & fats Crops and Lipids**, v. 25, n. 1:D102, 2017.

CHEN, C.; HUANG, D.; LIU, J. Functions and toxicity of nickel in plants: recent advances and future prospects. **Clean**, v. 37, n. 4-5, p. 304-313, 2009.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **12° Levantamento - Safra 2023-24**: tabela de dados – produção e balanço de oferta e demanda de grãos. 2024. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/graos/boletim-da-safra-de-graos>>. Acesso em: 22/11/2024.

COOPER, J. E.; SCHERER, H. W. Nitrogen fixation. In: MARSCHNER, P. **Mineral Nutritional of Higher Plants**. 3. ed. London: Academic Press, 2012. p. 389-408.

CORTESE, D.; JUNIOR, C. P.; WALTER, J. B.; CORTESE, D.; OLIVEIRA, S. Enrichment,

quality, and productivity of soybean seeds with cobalt and molybdenum applications. **Journal of Seed Science**, v. 41, n. 2, p. 144-150, 2019.

DALL'AGNOL, A. **A Embrapa Soja no contexto do desenvolvimento da soja no Brasil: histórico e contribuições**. Brasília, DF: Embrapa Soja, 2016.

DIESEL, P.; SILVA, C. A. T.; SILVA, T. R. B.; NOLLA, A. Molibdênio e cobalto no desenvolvimento da cultura da soja. **Agrarian**, v. 3, n. 8, p. 169-174, 2010.

DIMKPA, C. O.; BINDRABAN, P. S. Fortification of micronutrients for efficient agronomic production: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 36, n. 7, p. 1-27, 2016.

DOMINGOS, C. S.; LIMA, L. H. S.; BRACCINI, A. L. Nutrição mineral e ferramentas para o manejo da adubação na cultura da soja. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 14, n. 3, p. 132-140, 2015.

EINHARDT, A. M.; FERREIRA, S.; RODRIGUES, F. A. Biochemical and physiological responses of soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] to nickel toxicity. **Bragantia**, v. 80, e1721, 2021.

ESKEW, D. L.; WELCH, R. M.; CARY, E. E. Nickel: an essential micronutrient for legumes and possibly all higher plants. **Science New Series**, v. 222, n. 4624, p. 621-623, 1983.

ESKEW, D. L.; WELCH, R. M.; NORVELL, W. A. Nickel in higher plants. **Plant Physiology**, v. 76, p. 691-693, 1984.

FADIGAS, F. S.; SOBRINHO, N. M. B. A.; MAZUR, N.; ANJOS, L. H. C. Estimation of reference values for cadmium, cobalt, chromium, copper, nickel, lead and zinc in Brazilian soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 37, p. 945-959, 2006.

FERREIRA, S. C.; MATSUO, E.; SEDIYAMA, T.; GLASENAPP, J. S. Taxonomia, citogenética e hibridação interespecífica. In: SEDIYAMA, T. **Melhoramento genético da soja**. Londrina: Editora Mecenias, 2015. p. 19-32.

FRANÇA-NETO, J. B.; KRZYZANOWSKI, F. C.; HENNING, A. A.; PÁDUA, G. P.; LORINI, I.; HENNING, F. A. **Tecnologia da produção de semente de soja de alta qualidade**. Londrina, PR: Embrapa Soja, 2016. (Documentos 380).

FREITAS, D. S.; RODAK, B. W.; CARNEIRO, M. A. C.; GUILHERME, L. R. G. How does Ni fertilization affect a genotype? A dose study. **Plant Soil**, v. 441, p. 567-586, 2019.

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. 1-16, 2018.

GAZZONI, D. L.; DALL'AGNOL, A. **A saga da soja: de 1050 a.C. a 2050 d.C.** Brasília, DF: Embrapa Soja, 2021.

GELAIN, E.; JUNIOR, E. J. R.; MERCANTE, F. M.; FORTES, D. G.; SOUZA, F. R.;

ROSA, Y. B. C. J. Fixação biológica de nitrogênio e teores foliares de nutrientes na soja em função de doses de molibdênio e gesso agrícola. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 2, p. 259-269, 2011.

GRUBERGER, Gabriel Asa Corrêa. **Enriquecimento de sementes de soja com cobalto e molibdênio**. 2016. 75 f. Dissertação (Mestrado em Biologia na Agricultura e no Ambiente). Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; MENDES, I. C. **A importância do processo de fixação biológica do nitrogênio para a cultura da soja**: componente essencial para a competitividade do produto brasileiro. Londrina, PR: Embrapa Soja, 2007. (Documentos 283).

IPNI. International Plant Nutrition Institute. **Informação agrônômica sobre nutrientes para as plantas**: cobalto. Piracicaba, SP: IPNI, 2012. 2 p.

IYAKA, Y. A. Nickel in soils: a review of its distribution and impacts. **Scientific Research and Essays**, v. 6, n. 33, p. 6774-6777, 2011.

KAISER, B. N.; GRIDLEY, K. L.; BRADY, J. N.; PHILLIPS, T.; TYERMAN, S. The role of molybdenum in agricultural plant production. **Annals of Botany**, v. 96, p. 745-754, 2005.

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.

LAVRES, J.; FRANCO, G. C.; CÂMARA, G. M. S. Soybean seed treatment with nickel improves biological nitrogen fixation and urease activity. **Frontiers in Environmental Science**, v. 4, n. 37, p. 11 p, 2017.

LEVY, C. C. B.; MELLIS, E. V.; MURRER, M. K.; INGLÉS, C. R.; DAYNES, C. N.; CAVALLI, E.; CHIBA, M. K. Effects of nickel fertilization on soybean growth in tropical soils. **Bragantia**, v. 78, n. 3, p. 432-443, 2019.

LINDSTRÖM, K.; MOUSAVI, S. A. Effectiveness of nitrogen fixation in rhizobia. **Microbial Biotechnology**, v. 13, n. 5, p. 1314-1335, 2020.

LIU, Juhong. **Cobalt**: physiological effects and uptake mechanisms in plants. 1998. 152 f. Tese (Doutorado) - University of Adelaide, Adelaide, 1998.

LIU, X.; HE, J.; WANG, Y.; XING, G.; LI, Y.; YANG, S.; ZHAO, T.; GAI, J. Geographic differentiation and phylogeographic relationships among world soybean populations. **The Crop Journal**, v. 8, p. 260-272, 2020.

LOPES, F. **USDA confirma Brasil como “campeão mundial” no mercado de soja**. 2023. Disponível em: <<https://www.infomoney.com.br/negocios/usda-confirma-brasil-como-campeao-mundial-no-mercado-de-soja/>>. Acesso em: 23/01/2024.

MACEDO, F. G.; BRESOLIN, J. D.; SANTOS, E. F.; FURLAN, F.; SILVA, W. T. L.; POLACCO, J. C.; LAVRES, J. Nickel availability in soil as influenced by liming and its role

- in soybean nitrogen metabolism. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 1-12, 2016.
- MAEY, S.; KUMAR, R.; SHARMA, M.; KUMAR, V.; BHARDWAJ, R. A critical review on toxicity of cobalt and its bioremediation strategies. **Springer Nature Applied Sciences**, v. 2, n. 1279, 2020.
- MAHMUD, K.; MAKAJU, S.; IBRAHIM, R.; MISSAOUI, A. Current progress in nitrogen fixing plants and microbiome research. **Plants**, v. 9, 17 p. 2020.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251 p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios de aplicação**. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319 p.
- MARCONDES, J. A. P.; CAIRES, E. F. Aplicação de molibdênio e cobalto na semente para cultivo da soja. **Bragantia**, v. 64, n. 4, p. 687-694, 2005.
- MARCOS FILHO, J. Importância do potencial fisiológico da semente de soja. **Informativo Abrates**, v. 23, n. 1, p. 21-24, 2013.
- MARSCHNER, H. Functions of mineral nutrients: micronutrients. *In*: MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 2. ed. Stuttgart-Hohenheim: Academic Press, 1995b. p. 313-404.
- MARSCHNER, H. Beneficial mineral elements. *In*: MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 2. ed. Stuttgart-Hohenheim: Academic Press, 1995a. p. 405-435.
- MATA, F. S. D.; ALMEIDA, J. A. R.; REIS, T. C.; SOUZA, D. S.; MAURICIO, I. S. Eficiência da fixação biológica de nitrogênio na cultura da soja com aplicação de diferentes doses de molibdênio (Mo) e cobalto (Co). **Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 5, n. 2, p. 1-7, 2011.
- MILANI, G. L.; OLIVEIRA, J. A.; PEREIRA, E. M.; CARVALHO, B. O.; OLIVEIRA, G. E.; COSTA, R. R. Aplicação foliar de molibdênio durante a maturação de sementes de soja. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 4, p. 810-816, 2010.
- MILANI, G. L.; OLIVEIRA, J. A.; SILVA, L. H. C.; VON PINHO, E. V. R.; GUIMARÃES, R. M. Nodulação e desenvolvimento de plantas oriundas de sementes com altos teores de molibdênio. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 30, n. 2, p. 19-27, 2008.
- MORAES, L. M. F.; LANA, R. M. Q.; MENDES, C.; MENDES, E.; MONTEIRO, A.; ALVES, J. F. Redistribuição de molibdênio aplicado via foliar em diferentes épocas na cultura da soja. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 5, p. 1496-1502, 2008.
- MUS, F.; CROOK, M. B.; GARCIA, K.; COSTAS, A. G.; GEDDES, B. A.; KOURI, E. D.; PARAMASIVAN, P.; RYU, M. H.; OLDROYD, G. E. D.; POOLE, P. S.; UDVARDI, M. K.; VOIGT, C. A.; ANÉ, J. M.; PETERS, J. W. Symbiotic nitrogen fixation and the challenges to its extension to nonlegumes. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 82, n. 13, p.

3698-3710, 2016.

NAKAO, A. H.; VAZQUEZ, G. H.; OLIVEIRA, C. O.; SILVA, J. C.; SOUZA, M. F. P. Aplicação foliar de molibdênio em soja: efeitos na produtividade e qualidade fisiológica da semente. **Enciclopédia Biosfera**, v. 10, n. 18, p. 343-352, 2014.

NAQIB, S. A.; JAHAN, M. S. The function of molybdenum and boron on the plants. **Journal of Agricultural Research**, v. 2 n. 3, p. 1-9, 2017.

NETO, José Vieira Santos. **Forma de aplicação do níquel, cobalto e molibdênio em sistema plantio direto na cultura da soja**. 2017. 72 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

OLIVEIRA, C. M.; MEERT, L.; HANEL, A.; RAMOS, M. L.; KRENSKI, A. Aplicação foliar de nitrogênio, enxofre, molibdênio e níquel e seus efeitos sobre as características agronômicas e teor de proteína da soja. **Journal of Agronomic Sciences**, v. 7, n. 1, p.79-86, 2018.

OLIVEIRA, J. B.; LAVRES, J.; KOPITKE, P. M.; CHANEY, R. L.; HARRIS, H. H.; ERSKINE, P. D.; HOWARD, D. L.; REIS, A. R.; ENT, A. V. D. Unravelling the fate of foliar-applied nickel in soybean: a comprehensive investigation. **Plant Soil**, v. 502, p. 537-556, 2024.

OLIVEIRA, C. O.; PINTO, C. C.; GARCIA, A.; BETTIOL, J. V. T.; DE SÁ, M. E.; LAZARINI, E. Produção de sementes de soja enriquecidas com molibdênio. **Revista Ceres**, v. 64, n. 3, p. 282-290, 2017.

PADHI, P. P.; MISHRA, A. P. The role of molybdenum in crop production. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 8, n. 5, p. 1400-1403, 2019.

PÉREZ-CERVANTES, S. A.; ZOGLI, P.; AMINI, S.; THIBIVILLIERS, S.; TENNANT, S.; HOSSAIN, M. S.; XU, H.; MEYER, I.; NOOKA, A.; MA, P.; YAO, Q.; NALDRETT, M. J.; FARMER, A.; MARTIN, O.; BHATTACHARYA, S.; KLÄVER, J.; LIBAULT, M. Single-cell transcriptome atlases of soybean root and mature nodule reveal new regulatory programs that control the nodulation process. **Plant communications**, v. 5, 100984, 2024.

POSSENTI, J.; VILLELA, F. A. Efeito do molibdênio aplicado via foliar e via sementes sobre o potencial fisiológico e produtividade de sementes de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 32, n. 4, p. 143-150, 2010.

POSSENTI, J. C.; VILLELA, F. A.; DELQUIQUI, E. M. Componentes de rendimento de soja (*Glycine max*) produzida com o uso de sementes enriquecidas por molibdênio. **Synergismus Scientifica UTFPR**, v. 4, n. 1, 3 p., 2009.

PRASAD, R.; SHIVAY, Y. S. Nickel in environment and plant nutrition: a mini review. **International Journal of Plant and Environment**, v. 5, n. 4, p. 239-242, 2019.

RANA, M. S.; BHATANA, P.; IMRAN, M.; SALEEM, M. H.; MOUSSA, M. G.; KHAN, Z.; KHAN, I.; ALAM, M.; ABBAS, M.; BINYAMIN, R.; AFZAL, J.; SYAIFUDIN, M.; DIN, I. U.; YOUNAS, M.; AHMAD, SHAH, M. A.; HU, C. Molybdenum potential vital role in

plants metabolism for optimizing the growth and development. **Annals of Environmental Science and Toxicology**, v. 4, n. 1 p. 32-44, 2020.

REIS, A. R.; BARCELOS, J. P. Q.; OSÓRIO, C. R. W. S.; SANTOS, E. F.; LISBOA, L. A. M. SANTINI, J. M. K.; SANTOS, M. J. D.; JUNIOR, E. F.; CAMPOS, M.; FIGUEIREDO, P. A. M.; LAVRES, J.; GRATÃO, P. L. A glimpse into the physiological, biochemical and nutritional status of soybean plants under Ni-stress conditions. **Environmental and Experimental Botany**, v. 144, p. 76-87, 2017.

RODAK, Bruna Wurr. **Níquel em solos e na cultura da soja**. 2014. 100 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

RODAK, B. W.; FREITAS, D. S.; ROSSI, L. M.; LINHARES, F. S.; MORO, E.; CAMPOS, C. N. S.; REIS, A. R.; GUILHERME, L. R. G.; LAVRES, J. A study on nickel application methods for optimizing soybean growth. **Scientific Reports**, v. 14:10556, 2024.

RODRÍGUEZ-JIMÉNEZ, T. J.; OJEDA-BARRIOS, D. L.; BLANCO-MACÍAS, F.; VALDEZ-CEPEDA, R. D.; PARRA-QUEZADA, R. Urease and nickel in plant physiology. **Revista Chapingo Serie Horticultura**, v. 22, n. 2, p. 69-81, 2016.

RUSSEL, G.; ZULFIQAR, F.; HANCOCK, J. T. Hydrogenases and the role of molecular hydrogen in plants. **Plants**, v. 9, 15 p., 2020.

SACHANM P.; LAL, N. An overview of nickel ( $\text{Ni}^{+2}$ ) essentiality, toxicity and tolerance strategies in plants. **Asian Journal of Biology**, v. 2, n. 4, p. 1-15, 2017.

SEDIYAMA, T.; OLIVEIRA, R. C. T.; SEDIYAMA, H. A. A soja. *In*: SEDIYAMA, T. **Produtividade da soja**. Londrina: Editora Mecenas, 2016. p. 11-18.

SFREDO, G. J. **Soja no Brasil: calagem, adubação e nutrição mineral**. Londrina: Embrapa Soja, 2008. 148 p.

SFREDO, G. J.; OLIVEIRA, M. C. N. **Soja: molibdênio e cobalto**. Londrina: Embrapa Soja, 2010. (Documentos 322).

SIEGBAHN, P. E. M. The mechanism for nitrogenase including all steps. **Physical Chemistry Chemical Physics**, v.21, p.15747-15759, 2019.

SILVA, Hellismar Wakson da Silva. **Enriquecimento de sementes de soja com níquel e molibdênio: produtividade, qualidade fisiológica e sanitária**. 2021. 74 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia com área de concentração em Produção Vegetal). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2021.

SMEDLEY, P. L.; KINNIBURGH, D. G. Molybdenum in natural waters: a review of occurrence distributions and controls. **Applied Geochemistry**, v. 84, p. 387-432, 2017.

SOUMARE, A.; DIEDHIOU, A. G.; THUITA, M.; HAFIDI, M.; OUHDOUCH, Y.; GOPALAKRISHNAN, S.; KOUSINI, L. Exploiting biological nitrogen fixation: a route towards a sustainable agriculture. **Plants**, v. 9, 22 p, 2020.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. Assimilação de nutrientes inorgânicos. *In*: TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. p. 353-376.

TELLES, T. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Economic value of biological nitrogen fixation in soybean crops in Brazil. **Environmental Technology & Innovation**, v. 31, p. 1-10, 2023.

USDA. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **World agricultural production**. 2024. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>>. Acesso em: 22/11/2024.

### 3 ARTIGO A: PRODUÇÃO, COMPOSIÇÃO, QUALIDADE FISIOLÓGICA E DESEMPENHO DE SEMENTES DE SOJA ENRIQUECIDAS COM MOLIBDÊNIO

#### 3.1 RESUMO

O molibdênio (Mo) é um nutriente essencial ao funcionamento da fixação biológica do nitrogênio (FBN) na cultura da soja. A aplicação de Mo no tratamento de sementes tem sido usada por agricultores, porém a salinidade do nutriente pode prejudicar a germinação das sementes e a viabilidade de bactérias inoculadas. Assim, o enriquecimento da semente de soja com Mo é uma alternativa para otimizar a FBN sem prejudicar a germinação da soja e a viabilidade dos rizóbios. Objetivou-se avaliar o efeito de épocas de aplicação foliar e doses de Mo para enriquecimento sobre os componentes de produção e produtividade de sementes da planta-mãe; teores de Mo, óleo e proteína, e qualidade fisiológica das sementes produzidas; e índice de clorofila, nodulação e desempenho fitométrico das plantas oriundas destas sementes. Foi conduzido um experimento nos anos agrícolas 2021/2022 e 2022/2023, em blocos casualizados com quatro repetições, com dez tratamentos resultantes de um esquema fatorial 2 (com e sem 33,3 g ha<sup>-1</sup> Mo em R1) x 5 (0; 73,5; 147; 220,5; 294 g ha<sup>-1</sup> Mo em R5.2). Foram avaliados: componentes de produção e produtividade da planta-mãe. As sementes foram avaliadas quanto aos teores de Mo, óleo e proteína, e qualidade fisiológica. Depois de constatado o enriquecimento com Mo, as sementes foram cultivadas em vaso, sendo avaliados: índice de clorofila; desempenho fitométrico e nodulação das plantas. As aplicações de Mo não prejudicaram o crescimento e desenvolvimento da planta-mãe, assim como a produtividade de sementes. O incremento de Mo nas sementes não foi observado com aplicação em R1, porém foi linear com o aumento das doses em R5.2. O efeito positivo da aplicação de Mo sobre o teor de proteína e qualidade fisiológica das sementes foi variável entre os anos agrícolas. Houve melhoria na nodulação e índice de clorofila, e conseqüentemente, no crescimento e desenvolvimento das plantas oriundas das sementes enriquecidas com a dose de 220,5 g ha<sup>-1</sup> de Mo.

**Palavras-chave:** *Glycine max* (L.) Merrill; enriquecimento de sementes; produtividade de sementes; fixação biológica de nitrogênio; nodulação.

## PRODUCTION, COMPOSITION, PHYSIOLOGICAL QUALITY AND PERFORMANCE OF SOYBEAN SEED ENRICHED WITH MOLYBDENUM

### 3.2 ABSTRACT

Molybdenum (Mo) is an essential nutrient to the functioning of biological nitrogen fixation (BNF) in soybean crop. The application of Mo in seed treatment has been used by producers, however the nutrient salinity might harm seed germination and viability of inoculated bacteria. Based on that, the enrichment of soybean seed with Mo is an alternative to optimize BNF without harming soybean seed germination and viability of rhizobia. It was aimed to assess the effect of foliar application times and doses of Mo for enrichment over yield components and seed yield of the mother-plant; contents of Mo, oil and protein, and physiological quality of produced seed; and chlorophyll index, nodulation and biometric performance of plants derived of these seed. It was carried out an experiment in 2021/2022 and 2022/2023 growing seasons, in randomized block design with four repetitions, with ten treatments resultant of a factorial scheme 2 (with and without 33.3 g ha<sup>-1</sup> Mo in R1) x 5 (0; 73.5; 147; 220.5; 294 g ha<sup>-1</sup> Mo in R5.2). It were assessed: yield components and seed yield of the mother-plant. The seed were assessed for Mo, oil and protein content, and physiological quality. Once verified the enrichment with Mo, the seed were grown in pot, being assessed: chlorophyll index, biometric performance and nodulation of plants. The Mo applications did not harm growing and development of the mother-plant, as well as seed yield. The increment of Mo in seed was not observed with application in R1, although it was linear with increasing doses in R5.2. The positive effect of Mo application over protein content and physiological quality of seed was variable between growing seasons. There was improvement in nodulation and chlorophyll index, and hence, in growing and development of plants derived of seed enriched with the dose 220.5 g ha<sup>-1</sup> Mo.

**Keywords:** *Glycine max* (L.) Merrill; seed enrichment; seed yield; biological nitrogen fixation; nodulation.

### 3.3 INTRODUÇÃO

A soja é a cultura que mais produz proteína em relação às principais culturas proteicas, contendo as sementes aproximadamente 40% de proteína (SEMBA *et al.*, 2021). Para formação de proteína é necessário que haja suprimento adequado de nitrogênio (N) à cultura, que demanda em média 80 kg para cada tonelada de sementes produzida (BENDER *et al.*, 2015). Em condições brasileiras, se essa quantia tivesse que ser fornecida via fertilizante nitrogenado, estima-se que haveria gasto adicional de 15,2 bilhões de dólares (dados do ano agrícola 2019/2020), o que é contornado com a FBN (TELLES; NOGUEIRA; HUNGRIA, 2023).

O sucesso da FBN em condições brasileiras ao longo dos anos se deu graças à seleção criteriosa de estirpes capazes de estabelecer relação simbiótica eficaz, e tornou a soja independente ao fertilizante nitrogenado (SANTOS; NOGUEIRA; HUNGRIA, 2019). Um avanço significativo ao processo foi o tratamento de sementes com o nutriente Mo, que é necessário à FBN por atuar como carreador de elétrons para que haja o ideal funcionamento da nitrogenase (RANA *et al.*, 2020), única enzima na natureza capaz de clivar a tripla ligação covalente, altamente estável, da N<sub>2</sub> (SIEGBAHN, 2019).

De início, várias pesquisas foram conduzidas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) no sentido de ajustar o fornecimento do nutriente às plantas, e então foi estabelecido aplicar de 12 a 25 g ha<sup>-1</sup> Mo no tratamento de sementes ou também, via foliar até no máximo 15 dias após a semeadura (SFREDO; OLIVEIRA, 2010), ou entre os estádios V3 e V5 (MERCANTE *et al.*, 2011). No contexto do tratamento de sementes, surge a preocupação do nutriente se tornar salino às bactérias fixadoras veiculadas via inoculante, o que prejudicaria o processo (CAMPO; ARAÚJO; HUNGRIA, 2009).

Desta forma, sabendo do padrão de distribuição do nutriente na planta e de seu acúmulo nas sementes quando aplicado via folha (BURSAKOV *et al.*, 2023), foi iniciada uma linha de estudos visando enriquecer sementes com Mo, o que evitaria sua aplicação no tratamento de sementes quando essas sementes fossem semeadas. Os resultados obtidos foram positivos, e desde então o enriquecimento de sementes com Mo passou a ser uma alternativa no cultivo da soja (CAMPO; ARAÚJO; HUNGRIA, 2009).

Alguns trabalhos têm atribuído melhoria de qualidade fisiológica das sementes quando enriquecidas com Mo (NAKAO *et al.*, 2014; CARDOSO *et al.*, 2021), porém, os resultados na literatura são controversos (MILANI *et al.*, 2010; POSSENTI e VILLELA, 2010). Assim, novas pesquisas envolvendo épocas de aplicação e doses de Mo

para enriquecimento são necessárias, tanto a fim de se compreender melhor o padrão de resposta da planta-mãe, assim como das sementes produzidas e das plantas oriundas destas sementes, visando contribuir com mais informações sobre esta prática.

Neste sentido, o objetivo do trabalho foi avaliar o efeito de épocas de aplicação foliar e doses de Mo para enriquecimento sobre os componentes de produção e produtividade de sementes da planta-mãe; teores de Mo, óleo e proteína, e qualidade fisiológica das sementes produzidas; e índice de clorofila, nodulação e desempenho fitométrico das plantas oriundas destas sementes.

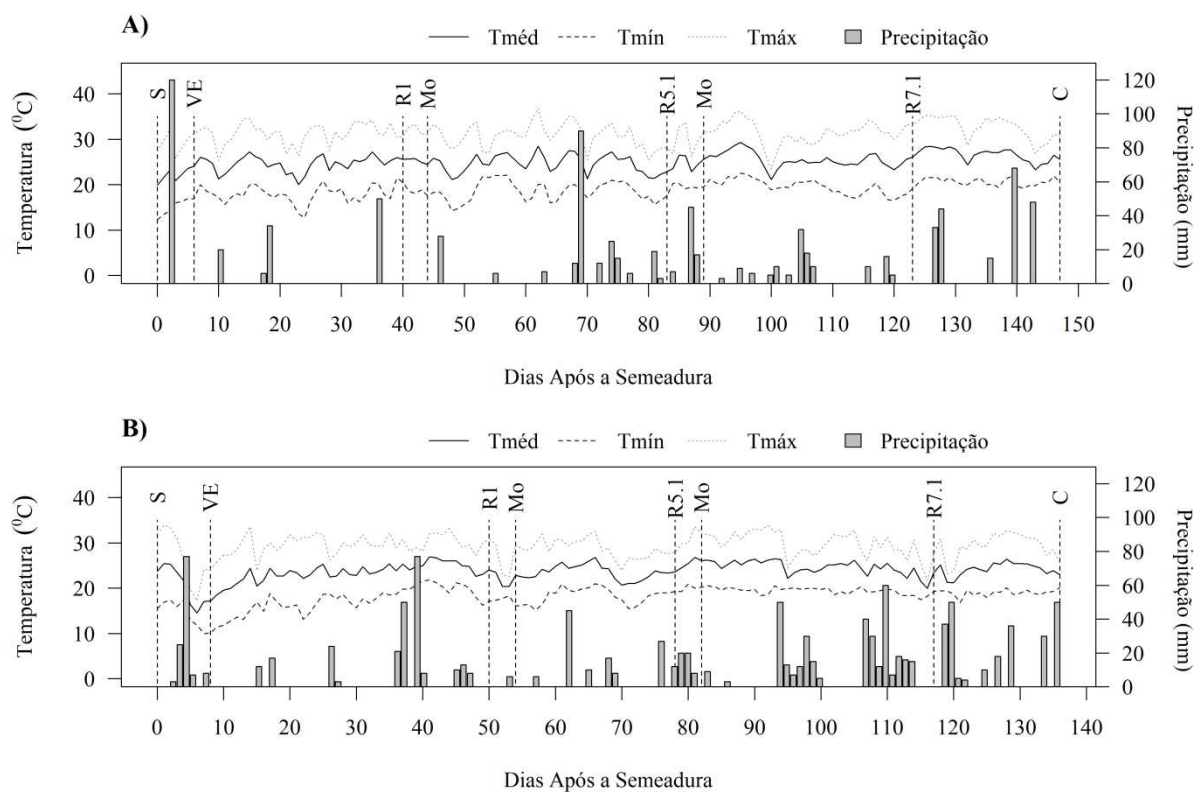
### 3.4 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.4.1 Descrição do Local Experimental (Produção das Sementes)

O experimento foi conduzido nos anos agrícolas 2021/2022 e 2022/2023 na Fazenda Escola da Universidade Estadual de Londrina, sob coordenadas geográficas de 23°20'29"S e 51°12'40"O, e altitude de 560 m. O solo é classificado como Latossolo Vermelho (EMBRAPA, 2018). O clima regional segundo a classificação de Köppen é do tipo Cfa, descrito como subtropical úmido, com verões quentes, apresentando geadas pouco frequentes e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, contudo sem estação seca definida (NITSCHE *et al.*, 2019).

Os dados de temperatura referentes aos períodos de condução do experimento foram obtidos na estação meteorológica do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná em Londrina (IDR) (Figuras 3-1A e 3-1B, para 2021/2022 e 2022/2023, respectivamente), e os dados pluviométricos foram coletados no local do experimento. Para o ano agrícola 2021/2022, os valores de precipitação pluvial acumulada, temperaturas máximas, médias e mínimas foram de: 859 mm, 31,3°C, 24,2°C e 18,9°C, respectivamente. Para 2022/2023, 1124 mm, 29,3°C, 22,9°C e 18,2°C, respectivamente.

**Figura 3-1** - Dados diários de precipitação pluvial, temperaturas máximas, médias e mínimas. S: semeadura; VE: emergência; R1: 50% das plantas com uma flor aberta; Mo: primeira aplicação de molibdênio; R5.1: grãos perceptíveis ao tato a 10% de granação; Mo: segunda aplicação de molibdênio; R7.1: início a 50% de amarelecimento de folhas e vagens; C: colheita. Londrina-PR, anos agrícolas 2021/2022 (A) e 2022/2023 (B).



Antes da instalação do experimento foram coletadas subamostras de solo na camada de 0-20 cm de profundidade, as quais depois de homogeneizadas resultaram em uma amostra composta que foi utilizada para a caracterização dos atributos químicos (Tabela 3-1).

**Tabela 3-1** - Atributos químicos do solo (0-20 cm) na área de condução do experimento onde foram produzidas as sementes. Londrina-PR, anos agrícolas 2021/2022 e 2022/2023.

<sup>1</sup> Ano	pH CaCl <sub>2</sub>	H+Al	Al <sup>+3</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	K <sup>+</sup>	P	CTC efetiva	CTC pH 7,0	MO
	-----	-----	-----	-----	-----	-----	mg dm <sup>-3</sup>	---cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ---	---cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ---	%
<b>2021/2022</b>	7,0	3,00	-----	4,47	2,01	0,21	17,86	6,71	9,69	1,94
<b>2022/2023</b>	5,0	9,41	-----	3,74	1,87	0,95	14,18	6,60	16,00	2,28

<sup>1</sup>CTC: capacidade de troca de cátions; MO: matéria orgânica.

### 3.4.2 Delineamento Experimental e Tratamentos Empregados (Produção das Sementes)

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, com quatro repetições. Cada unidade experimental foi composta de seis linhas de 5 m de comprimento,

espaçadas de 0,45 m, totalizando 13,5 m<sup>2</sup>. A área útil foi representada pelas quatro linhas centrais de cada parcela, descontados 1,0 m das extremidades, totalizando 5,4 m<sup>2</sup>. Os tratamentos resultaram de um esquema fatorial 2x5, totalizando dez tratamentos, sendo: 2 (com e sem 33,3 g ha<sup>-1</sup> Mo em R1); e 5 doses de molibdênio (0; 73,5; 147; 220,5; 294 g ha<sup>-1</sup> Mo em R5.2).

### 3.4.3 Implantação e Condução (Produção das Sementes)

A semeadura foi realizada de forma mecanizada, com semeadora composta de seis linhas espaçadas de 0,45 m. No ano agrícola 2021/2022, a semeadura foi realizada na data de 21/10/2021, utilizando-se a cultivar BMX FIBRA 64I61RSF IPRO, de hábito de crescimento indeterminado e de grupo de maturação 6.4, visando-se estabelecer a densidade de 320.000 plantas ha<sup>-1</sup>. No momento da semeadura as sementes foram inoculadas com inoculante líquido (*Bradyrhizobium elkani*), na dose de 100 mL 50 kg sementes<sup>-1</sup>. No ano agrícola 2022/2023, a semeadura foi realizada na data de 27/10/2022, utilizando-se a cultivar NA5909 RG, de hábito de crescimento indeterminado e de grupo de maturação 6.2, visando-se estabelecer a densidade de 320.000 plantas ha<sup>-1</sup>. No momento da semeadura, as sementes foram inoculadas com inoculante turfoso (*Bradyrhizobium elkani* + *Bradyrhizobium diazoefficiens*), na dose de 60 g ha<sup>-1</sup>.

As adubações de base e de cobertura foram ajustadas de acordo com a análise química de caracterização do solo e segundo as recomendações técnicas, almejando-se a produtividade superior a cinco toneladas por hectare (PAULETTI; MOTTA, 2017). A adubação de base no ano agrícola 2021/2022 consistiu de 70 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, utilizando-se o fertilizante 11-52-00 (MAP); a adubação de cobertura de 100 kg ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O, utilizando-se o fertilizante cloreto de potássio (60% K<sub>2</sub>O), distribuída manualmente por linha das parcelas, no estágio fenológico V4. A adubação de base no ano agrícola 2022/2023 consistiu de 70 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, utilizando-se o fertilizante 11-52-00 (MAP); a adubação de cobertura com cloreto de potássio não foi realizada devido à ausência de necessidade, conforme a análise de solo.

No estágio fenológico R1, foi aplicada formulação com densidade de 1,59 g cm<sup>-3</sup>, contendo 14% de molibdênio (222,6 g L<sup>-1</sup>), na dose de 33,3 g ha<sup>-1</sup> Mo. No estágio fenológico R5.2, foi aplicada formulação com densidade de 1,50 g cm<sup>-3</sup>, contendo 14% de molibdênio (210 g L<sup>-1</sup>), nas doses de 0; 73,5; 147; 220,5; 294 g ha<sup>-1</sup> Mo. Em ambas as aplicações, foi adicionado adjuvante na dose de 1 mL L<sup>-1</sup>. Foi utilizado pulverizador costal com barra de pulverização de quatro pontas espaçadas de 0,32 m, ajustado para volume de

calda de 175 L ha<sup>-1</sup>. Durante o cultivo, além da aplicação dos tratamentos, foi realizado o monitoramento de pragas e doenças, procedendo-se o manejo quando necessário.

A colheita foi realizada após as plantas terem atingido a maturidade fisiológica, cortando-se as plantas rente ao solo. Primeiro, foi contabilizado o estande final de plantas na área útil de cada parcela para posterior análise estatística, e então, foram coletadas 10 plantas seguidas em uma das duas linhas centrais e amarradas em feixes para realização das avaliações de componentes de produção. As plantas restantes da área útil foram colhidas e amarradas em outro feixe, e depois trilhadas em trilhadeira estacionária. Durante o processamento das amostras, 600 gramas de sementes foram classificadas em peneira de 6,0 mm, separadas e armazenadas em câmara fria, a 10°C, até o momento de realização das análises para determinação dos teores de elementos químicos, e de testes de qualidade fisiológica.

#### 3.4.4 Avaliações Realizadas (Produção das Sementes)

Para os componentes de produção foram avaliados o número de vagens por planta, número de sementes por planta, número de sementes por vagem, massa de sementes por planta, massa de 100 sementes e produtividade, sendo que essas três últimas tiveram sua massa corrigida para 130 g de água por quilograma de sementes. A produtividade de sementes foi determinada somando-se a massa das 10 plantas colhidas para avaliação dos componentes de produção às restantes da área útil das parcelas.

Os teores dos elementos químicos nas sementes foram determinados separando-se durante o processamento das amostras, 200 gramas de sementes classificadas em peneira de 6,0 mm, resultantes do agrupamento de 50 gramas de cada repetição dos tratamentos, que formaram uma amostra composta por tratamento. Estas amostras foram analisadas segundo a metodologia proposta pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2009).

Os teores de óleo e proteína foram determinados em sementes íntegras pela técnica da Refletância do Infravermelho Próximo (NIR), conforme descrito por Heil (2010). As sementes inteiras e limpas foram submetidas às leituras em equipamento da marca Thermo, modelo Antaris II, dotado de esfera de integração com resolução de 4 cm<sup>-2</sup>, média de 32 scans e background a cada leitura. Para predição, foram utilizados modelos matemáticos desenvolvidos pela Embrapa Soja.

A germinação (primeira e segunda contagem) foi conduzida com oito

repetições de 50 sementes. O substrato para germinação foi previamente umedecido com água na proporção de 2,5 vezes a massa do papel seco e, após, as sementes foram uniformemente distribuídas sobre duas folhas e cobertas com uma, sendo a seguir embrulhadas na forma de rolo, os quais foram mantidos na posição vertical em germinador à temperatura constante de 25°C. No quinto e oitavo dias após a instalação foram avaliados a primeira e a segunda contagem, respectivamente, quantificando-se o número de plântulas normais, e o resultado foi expresso em porcentagem. O resultado da germinação resultou da soma da primeira e da segunda contagem (BRASIL, 2009).

O envelhecimento acelerado foi conduzido em caixas de gerbox contendo 40 mL de água. As sementes foram distribuídas em camada uniforme e única sobre tela, isolando as mesmas do contato com a água. Tampadas as caixas, estas foram acondicionadas em câmara de envelhecimento a 41°C por 48 horas (MARCOS FILHO, 1999). Após este período, foi instalada a germinação sob as mesmas condições descritas anteriormente, realizando-se avaliação no oitavo dia após instalação (BRASIL, 2009).

O comprimento de plântulas foi conduzido com oito repetições de 20 sementes. O substrato para germinação foi previamente umedecido com água na proporção de 2,5 vezes a massa do papel seco e, após este período, as sementes foram distribuídas de maneira descontraída em duas fileiras sobre duas folhas no terço superior, com a micrópila voltada para baixo. Em seguida, foram cobertas com uma folha, sendo posteriormente embrulhadas na forma de rolo, os quais foram mantidos na posição vertical em germinador à temperatura constante de 25°C (BRASIL, 2009), na ausência de luz. No quinto dia após a instalação foram realizadas as medições de comprimento de parte aérea, raiz e total de plântulas normais, com auxílio de régua milimetrada, sendo os resultados expressos em centímetros (NAKAGAWA, 1999).

A massa seca de plântulas foi conduzida conjuntamente com o teste de comprimento de plântulas. Após as aferições dos comprimentos, os cotilédones foram removidos e as plântulas foram acondicionadas em sacos de papel, sendo estes identificados e levados à estufa com circulação de ar forçada, mantida à temperatura de 80°C durante 24 horas (NAKAGAWA, 1999). Imediatamente após a retirada da estufa, as amostras foram pesadas em balança analítica, para obtenção da massa seca total de plântulas.

#### 3.4.5 Descrição do Local Experimental (Cultivo das Sementes Enriquecidas)

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de

Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, sob coordenadas geográficas (23°19'44"S, 51°12'13"O). O solo utilizado para preenchimento dos vasos é classificado como Latossolo Vermelho (EMBRAPA, 2018), e foi analisado anteriormente para caracterização dos atributos químicos (Tabela 3-2).

**Tabela 3-2** - Atributos químicos do solo utilizado para o preenchimento dos vasos para o cultivo das sementes enriquecidas. Londrina-PR, anos agrícolas 2021/2022 e 2022/2023.

<sup>1</sup> Ano	pH CaCl <sub>2</sub>	H+Al	Al <sup>+3</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	K <sup>+</sup>	P	Mo	CTC efetiva	CTC pH 7,0
	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
			-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----				---mg dm <sup>-3</sup> --		-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----	
<b>2021/2022</b>	5,01	5,11	0,00	1,58	0,59	0,03	1,42	0,00	2,21	7,32
<b>2022/2023</b>	4,62	4,47	0,00	0,43	0,54	0,01	9,70	0,00	0,98	5,45

<sup>1</sup>CTC: capacidade de troca de cátions; Mo: molibdênio.

As sementes enriquecidas foram semeadas em vaso, a fim de se avaliar o índice de clorofila, o desempenho fitométrico e nodulação das plantas. Para comparação com as sementes enriquecidas, foram incluídos mais dois tratamentos, utilizando-se sementes do tratamento controle, ou seja, que não receberam aplicação em R1 e R5.2. Os dois tratamentos foram: 25 g ha<sup>-1</sup> Mo no tratamento de sementes e 25 g ha<sup>-1</sup> Mo via foliar no estágio fenológico V4.

#### 3.4.6 Delineamento Experimental e Tratamentos Empregados (Cultivo das Sementes Enriquecidas)

O delineamento foi inteiramente casualizado com quatro repetições, composto de sete tratamentos: T1 (semente sem enriquecimento com Mo); T2 (semente enriquecida com 73,5 g ha<sup>-1</sup> Mo); T3 (semente enriquecida com 147 g ha<sup>-1</sup> Mo); T4 (semente enriquecida com 220,5 g ha<sup>-1</sup> Mo); T5 (semente enriquecida com 294 g ha<sup>-1</sup> Mo); T6 (25 g ha<sup>-1</sup> Mo no tratamento de semente); T7 (25 g ha<sup>-1</sup> Mo via foliar em V4).

#### 3.4.7 Implantação e Condução (Cultivo das Sementes Enriquecidas)

Após análise dos atributos químicos, foram realizadas a calagem e a adubação de base em volume de solo pré-determinado para o total de vasos a serem utilizados, considerando-se vasos com volume de cinco litros. Para calagem, utilizou-se calcário calcítico, visando-se elevar a saturação de bases a 60%. Para adubação, tomou-se

como referência a produtividade almejada de quatro t ha<sup>-1</sup> (PAULETTI; MOTTA, 2017), e foram adicionados: 25 e 17 kg ha<sup>-1</sup> N e 120 e 80 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> utilizando-se o fertilizante MAP (11-52-00); e 130 e 130 kg ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O utilizando-se o fertilizante cloreto de potássio (60% de K<sub>2</sub>O), para os anos agrícolas 2022/2023 e 2023/2024, respectivamente.

No momento da semeadura no ano agrícola 2022/2023, as sementes foram inoculadas com inoculante líquido contendo bactérias de *Bradyrhizobium japonicum* (5.10<sup>-9</sup> UFC mL<sup>-1</sup>), utilizando-se 150 mL 50 kg<sup>-1</sup> de sementes<sup>-1</sup>. Na semeadura no ano agrícola 2023/2024, as sementes foram inoculadas com inoculante turfoso contendo bactérias de *Bradyrhizobium japonicum* (5.10<sup>-9</sup> UFC g<sup>-1</sup>), utilizando 120 g 50 kg<sup>-1</sup> de sementes. Em ambos os anos, foi utilizada dose duplicada dos inoculantes em função do solo ser oriundo de encosta.

Após emergência e estabelecimento das plantas, no estágio fenológico VC, foi realizado desbaste, deixando-se três plantas por vaso. No estágio fenológico V4, foi aplicado o T7, com formulação contendo 8% de molibdênio (80 g L<sup>-1</sup>), na dose de 25 g ha<sup>-1</sup> Mo, sendo adicionado adjuvante na dose de 1 mL L<sup>-1</sup>. Foi utilizado pulverizador costal com barra de pulverização de quatro pontas espaçadas de 0,32 m, ajustado para vazão constante de 175 L ha<sup>-1</sup>.

#### 3.4.8 Avaliações Realizadas no Estádio Fenológico R2 (Cultivo das Sementes Enriquecidas)

O índice de clorofila foi avaliado tomando-se nas três plantas de cada repetição, o terceiro trifólio aberto do ápice para a base da planta, realizando-se a aferição no folíolo central. Para aferição, utilizou-se um Medidor Eletrônico de Teor de Clorofila da marca Falker (clorofiLOG – CFL1030).

Para o número e massa seca de nódulos, as plantas foram retiradas dos vasos para que as raízes fossem lavadas cuidadosamente em água corrente a fim de se remover o solo, sem que houvesse perda de nódulos. Posteriormente, as plantas com as raízes foram levadas ao laboratório para separação e contagem dos nódulos. A seguir, estes foram secos em estufa a 65°C por 24 h e pesados logo em seguida, em balança analítica.

O diâmetro do caule e a altura de planta foram mensurados nas três plantas de cada repetição após corte rente ao solo. O diâmetro foi tomado logo abaixo do primeiro nó visível, no sentido do menor diâmetro, sendo a aferição realizada com auxílio de paquímetro digital. A altura de plantas foi tomada medindo-se o comprimento da base ao topo da haste principal, com auxílio de trena graduada.

Para aferição da massa seca de plantas, as raízes foram removidas, e posteriormente as plantas foram acondicionadas em sacos de papel, sendo estes identificados e levados à estufa com circulação de ar forçada, mantida à temperatura de 80°C durante 24 horas (NAKAGAWA, 1999). Imediatamente após a retirada da estufa, as amostras foram pesadas em balança analítica.

#### 3.4.9 Análise dos Dados

Para componentes de produção e produtividade de sementes, teores de óleo e proteína e qualidade fisiológica das sementes, os dados foram testados para normalidade dos erros (teste de Shapiro-Wilk), homogeneidade de variâncias (teste de Bartlett) e independência dos erros (teste de Durbin-Watson); posteriormente, foram submetidos à análise de variância para delineamento de blocos casualizados; para o fator com e sem aplicação de Mo em R1, aplicou-se o teste F conclusivo; e para o fator doses de Mo em R5.2, regressão polinomial somente até segundo grau. Para análise dos teores dos elementos químicos nas sementes, em função do agrupamento das repetições, os dados foram plotados e depois realizada análise de regressão, optando-se pelo modelo matemático que melhor se ajustou ao conjunto de dados, com base na significância do  $p$  valor e também no maior  $R^2$ . Para comparar o enriquecimento aos demais tratamentos, escolheu-se a dose de Mo para enriquecimento que resultou nos maiores número e massa seca de nódulos, sendo este tratamento denominado de semente enriquecida; posteriormente, este tratamento foi comparado aos demais para todas as características avaliadas. Anteriormente, os dados foram testados para normalidade dos erros (teste de Shapiro-Wilk), homogeneidade de variâncias (teste de Bartlett) e independência dos erros (teste de Durbin-Watson). Posteriormente, foram submetidos à análise de variância para delineamento inteiramente casualizado, sendo empregado o teste de comparações múltiplas. Em todas as análises foi adotado o nível de probabilidade de erro de 5%, sendo que todas foram executadas através do programa computacional R, utilizando-se o pacote AgroR (SHIMIZU; MARUBAYASHI; GONÇALVES, 2024).

### 3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em ambos os anos agrícolas, as temperaturas mínima, média e máxima foram próximas as médias históricas e não foram limitantes ao crescimento da soja. Destaca-

se, entretanto, que para o primeiro ano agrícola (2021/2022), as temperaturas médias no primeiro decêndio foram um pouco superiores ao verificado no segundo ano (2022/2023), assim, observou-se desenvolvimento inicial retardado para 2022/2023. A precipitação pluvial total acumulada, de 859 mm para 2021/2022 e de 1124 mm para 2022/2023, atendeu às exigências da cultura, que demanda de 765 a 875 mm, de acordo com estimativas de Tagliapietra *et al.* (2021). Para 2021/2022, nota-se que as precipitações foram bem distribuídas nos decêndios, com exceção do intervalo de 20 a 35 dias após a semeadura, o que não prejudicou o desenvolvimento da cultura. A soja no período vegetativo é mais tolerante ao estresse hídrico (HENNING *et al.*, 2018). Para 2022/2023, observa-se que houve boa distribuição das precipitações, com volumes acumulados em todos os decêndios (Figura 3-1).

Observando-se a Tabela 3-3, nota-se que não houve efeito isolado em função das aplicações de Mo em R1 e R5.2 sobre nenhuma das características avaliadas, nos dois anos agrícolas. Porém, destaca-se que houve efeito de interação sobre a produtividade de sementes, no ano agrícola 2022/2023.

**Tabela 3-3** - Análise de variância com o *p* valor, média geral e coeficiente de variação (CV) das seguintes características avaliadas: número de vagens por planta (VGPL); número de sementes por planta (NSPL); número de sementes por vagem (NSVG); massa de sementes por planta (MSPL); massa de cem sementes (M100); e produtividade de sementes (PROD). Londrina-PR, anos agrícolas 2021/2022 e 2022/2023.

Ano agrícola 2021/2022						
FV	VGPL	NSPL	NSVG	MSPL	M100	PROD
MoR1 (R1)	0,98	0,81	0,26	0,44	0,54	0,17
MoR5.2 (R5.2)	0,12	0,20	0,77	0,12	0,65	0,47
Bloco	0,33	0,08	0,00	0,10	0,19	0,04
R1 x R5.2	0,87	0,84	0,25	0,94	0,91	0,93
Média	47,57	103,00	2,16	15,28	15,00	4456,71
CV (%)	14,65	15,63	3,71	15,74	5,84	5,77
Ano agrícola 2022/2023						
FV	VGPL	NSPL	NSVG	MSPL	M100	PROD
MoR1 (R1)	0,90	0,96	0,29	0,96	0,99	0,22
MoR5.2 (R5.2)	0,42	0,51	0,71	0,57	0,65	0,67
Bloco	0,77	0,83	0,94	0,62	0,41	0,08
R1 x R5.2	0,86	0,76	0,08	0,79	0,41	0,01
Média	37,72	80,03	2,12	12,39	15,78	3783,55
CV (%)	16,84	17,51	3,34	17,94	6,71	4,61

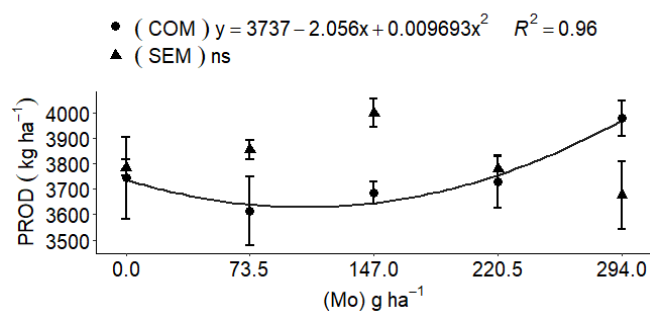
Significativo a 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ); significativo a 5% de probabilidade ( $p < 0,05$ ).

Na Figura 3-2, para o fator sem Mo em R1, não foi observado ajuste significativo para a produtividade de sementes em função do aumento das doses de molibdênio em R5.2. Por outro lado, para o fator com Mo em R1, houve ajuste quadrático

com o aumento das doses de Mo em R5.2, com ponto de mínima em  $106 \text{ g ha}^{-1} \text{ Mo}$ . Para este mesmo fator, na dose mais alta, de  $294 \text{ g ha}^{-1} \text{ Mo}$ , foi obtida a máxima produtividade, de  $3970 \text{ kg ha}^{-1}$ , valor acima da média nacional, de  $3202 \text{ kg ha}^{-1}$  (CONAB, 2024). Este resultado evidencia que a aplicação para enriquecimento das sementes, além de não ter prejudicado, elevou a produtividade.

A aplicação em R1 tem maior potencial de influenciar o crescimento e desenvolvimento da planta, enquanto que em R5.2, de influenciar o enchimento de sementes (RITCHIE *et al.*, 1977). Desta forma, o efeito combinado das duas aplicações contribuiu para o incremento em produtividade. Este incremento, somado ao fato de que a prática não resultou em fitotoxicidade à soja, mostra a técnica como viável, desde que ocorra o enriquecimento das sementes, com impactos positivos sobre a qualidade fisiológica e/ou desempenho das plantas oriundas destas sementes. Oliveira *et al.* (2017) parcelaram as doses de  $400$  e  $800 \text{ g ha}^{-1} \text{ Mo}$  em R3 e R6, e destacam que não foi observado efeito sobre a produtividade. Resultado positivo é destacado por Moreira *et al.* (2024) avaliando o intervalo de  $0$  a  $1600 \text{ g ha}^{-1} \text{ Mo}$ , aplicado apenas entre R1 e R2.

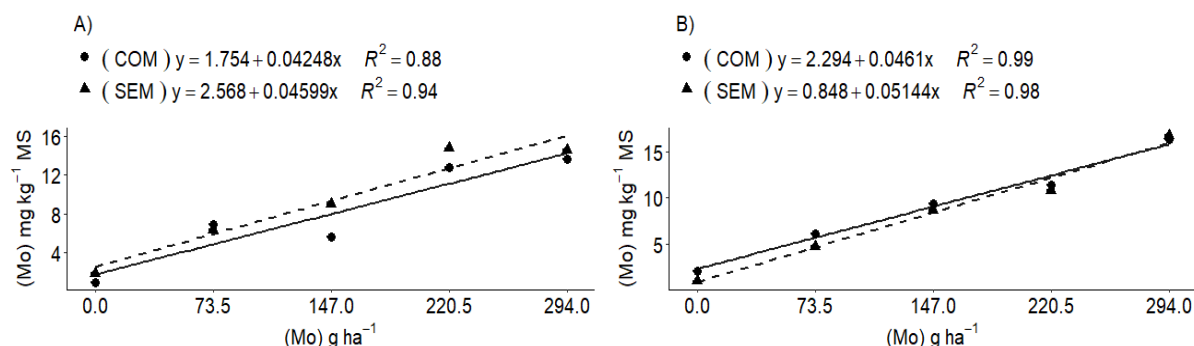
**Figura 3-2** - Produtividade de sementes de soja em função da presença (COM) e ausência (SEM) de aplicação de Mo em R1 e de doses de Mo em R5.2. Londrina-PR, ano agrícola 2022/2023.



Pela análise da composição de Mo nas sementes, Figura 3-3, observa-se que o enriquecimento foi atingido nos dois anos agrícolas, e apresentou comportamento semelhante (linear crescente) e próximo (retas com pequena distância entre si) em função do fator com e sem aplicação de Mo em R1. Este resultado permite inferir, que não aplicar Mo em R1 é mais viável, visto que os teores de Mo atingidos foram muito próximos, além do que, a aplicação em R1 se apresentaria como um custo adicional no campo de produção de sementes para se atingir o mesmo resultado. Milani *et al.* (2010) também observaram enriquecimento linear com o aumento das doses de Mo aplicadas, independentemente se em

dose única ou parcelada em R5.2 e R5.4, porém, os valores de Mo obtidos na semente foram superiores. Sementes enriquecidas contendo Mo acima de  $10 \text{ mg kg}^{-1}$  não necessitam de Mo no tratamento de sementes, apenas foliar (FRANÇA-NETO *et al.*, 2016).

**Figura 3-3** - Quantidade de Mo por quilo de matéria seca (MS) de sementes em função da aplicação de Mo no estágio fenológico R1 (COM e SEM) e de diferentes doses de Mo aplicadas em R5.2. Londrina-PR, anos agrícolas 2021/2022 (A) e 2022/2023 (B).



Com relação aos teores de óleo e proteína das sementes, observou-se efeito isolado do fator Mo em R5.2, somente sobre o teor de proteína, apenas no ano agrícola 2021/2022. Não foi observado efeito de interação nos dois anos agrícolas (Tabela 3-4).

**Tabela 3-4** - Análise de variância com o *p* valor, média geral e coeficiente de variação (CV) dos teores de óleo e proteína avaliados. Londrina-PR, anos agrícolas 2021/2022 e 2022/2023.

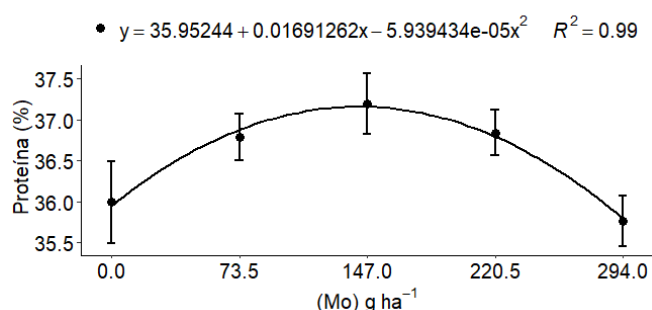
FV	Ano agrícola 2021/2022		Ano agrícola 2022/2023	
	OLÉO	PROTEÍNA	OLÉO	PROTEÍNA
MoR1 (R1)	0,41	0,84	0,42	0,22
MoR5.2 (R5.2)	0,44	0,03	0,44	0,20
Bloco	0,03	0,09	0,56	0,41
R1 x R5.2	0,51	0,25	0,94	0,62
Média	22,38	36,51	20,89	39,79
CV (%)	3,43	2,60	3,75	1,75

Significativo a 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ); significativo a 5% de probabilidade ( $p < 0,05$ ).

O teor de proteína se ajustou ao modelo quadrático em função do aumento das doses de Mo em R5.2, saindo do teor inicial de 35,95% e atingindo o máximo de 37,19%, ou seja, um incremento máximo de 1,20%, na dose de  $142 \text{ g ha}^{-1}$  Mo (Figura 3-4). Este comportamento para o teor de proteína está relacionado ao melhor metabolismo do N, visto que o Mo é essencial ao funcionamento da nitrogenase e da nitrato redutase. Arachchige *et al.* (2020) ao avaliarem o padrão semanal da FBN na soja, observaram que a formação dos nódulos atingiu o máximo no estágio fenológico R4, porém a FBN só começou a diminuir no

estádio R5.5. Assim, é provável que a aplicação em R5.2 no presente estudo tenha sido realizada ainda em tempo hábil, justificando a resposta dos teores de proteína obtidos. Com certa semelhança, Oliveira *et al.* (2017) observaram ajuste linear crescente no teor de proteína, com incremento de 9%, conforme o aumento das doses de Mo, independentemente da forma como é fornecido. Cardoso *et al.* (2021) não observaram aumento no teor de proteína, apesar de terem observado ajuste linear crescente de Mo nas sementes conforme o aumento das doses foliares de Mo aplicadas.

**Figura 3-4** - Teor de proteína de sementes de soja em função de doses de Mo aplicadas no estágio fenológico R5.2. Londrina-PR, ano agrícola 2021/2022.



Em se tratando dos testes realizados para avaliar a qualidade fisiológica de sementes (Tabela 3-5), foi observado efeito isolado do fator Mo em R5.2 no ano agrícola 2021/2022, somente para o teste de comprimento de parte aérea. Não foi observado efeito de interação nos dois anos agrícolas.

**Tabela 3-5** - Análise de variância com o *p* valor, média geral e coeficiente de variação (CV) das seguintes características avaliadas: primeira contagem da germinação (PCG); germinação (GERM); envelhecimento acelerado (ENVA); comprimento de parte aérea (CPA); comprimento de raiz (CR); comprimento total (CT); e matéria seca de plântulas (MS). Londrina-PR, anos agrícolas 2021/2022 e 2022/2023.

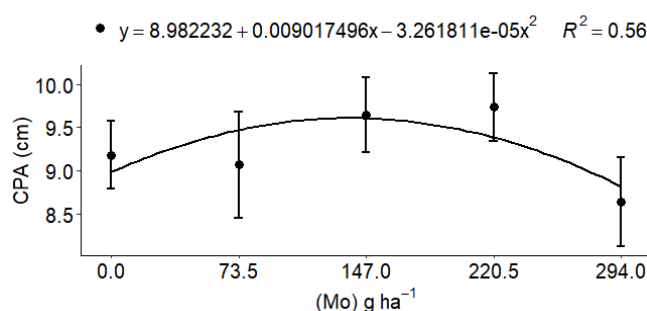
Ano agrícola 2021/2022							
FV	PCG	GER	ENVA	CPA	CR	CT	MS
MoR1 (R1)	0,55	0,60	0,43	0,64	0,83	0,93	0,88
MoR5.2 (R5.2)	0,49	0,72	0,54	0,04	0,04	0,03	0,96
Bloco	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
R1 x R5.2	0,96	0,97	0,76	0,26	0,53	0,30	0,47
Média	65,38	74,02	29,90	9,25	15,87	25,11	0,02
CV (%)	13,16	10,77	29,08	8,19	6,24	6,21	12,06
Ano agrícola 2022/2023							
FV	PCG	GER	ENVA	CPA	CR	CT	MS
MoR1 (R1)	0,20	0,41	0,44	0,42	0,70	0,51	0,11
MoR5.2 (R5.2)	0,35	0,45	0,69	0,86	0,46	0,62	0,36

Bloco	0,08	0,73	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00
R1 x R5.2	0,11	0,30	0,08	0,69	0,76	0,67	0,81
Média	79,08	81,78	21,28	8,74	15,36	24,11	0,03
CV (%)	5,38	5,32	54,64	8,62	5,47	5,87	7,26

Significativo a 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ); significativo a 5% de probabilidade ( $p < 0,05$ ). Para CR e CT, houve significância apenas para modelos cúbicos, portanto, desconsideradas.

O comprimento de parte aérea se ajustou ao modelo quadrático em função do aumento das doses de Mo em R5.2, saindo de 8,98 e atingindo 9,60 cm, ou seja, um incremento máximo de 0,62 cm, na dose de 138 g ha<sup>-1</sup> (Figura 3-5). O teste de comprimento de plântulas mede a capacidade de mobilização de reservas dos tecidos para o eixo embrionário em crescimento, assim, sementes com maior quantidade de reservas, ou mais vigorosas, darão origem a plântulas mais vigorosas (NAKAGAWA, 1999). O resultado de incremento do comprimento de parte aérea obtido pressupõe que foram obtidas plântulas mais vigorosas, oriundas de sementes mais vigorosas. Porém, trata-se de um resultado isolado dentre os demais testes de qualidade que foram realizados, o que dificulta concluir sobre o aumento de vigor de forma precisa. Nakao *et al.* (2014) observaram aumento linear na germinação e no comprimento de plântulas em função do aumento das doses de Mo aplicadas, corroborando parcialmente o presente estudo.

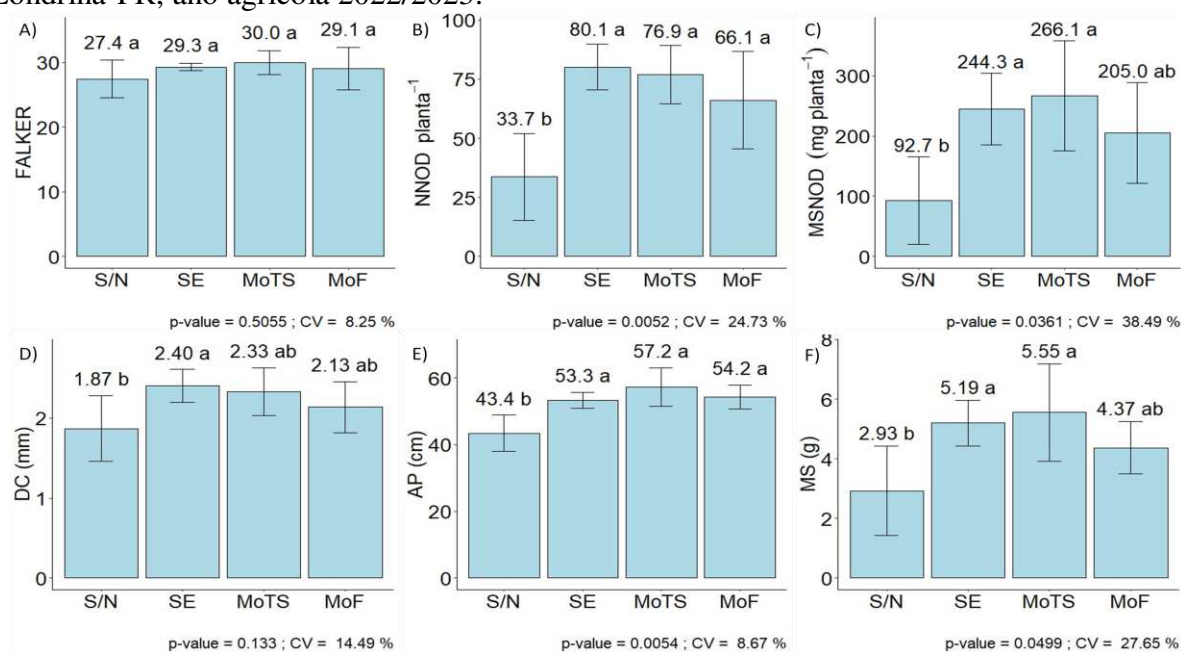
**Figura 3-5** - Comprimento de parte aérea (CPA) de plântulas oriundas de sementes enriquecidas com doses de Mo aplicadas em R5.2. Londrina-PR, ano agrícola 2021/2022.



Foram cultivadas em vaso as sementes sem nenhum tratamento com Mo; as enriquecidas com Mo que não receberam aplicação em R1 devido enriquecimento semelhante as que receberam aplicação em R1 (Figura 3-3); as que receberam Mo no tratamento de sementes; e as que receberam Mo via aplicação foliar no estágio fenológico V4. Observou-se que, para as sementes produzidas no ano agrícola 2021/2022, o índice de clorofila foi semelhante em todos os tratamentos (Figura 3-6A); o número e a massa seca de nódulos, o diâmetro do caule, a altura de plantas e a massa seca de plantas no florescimento

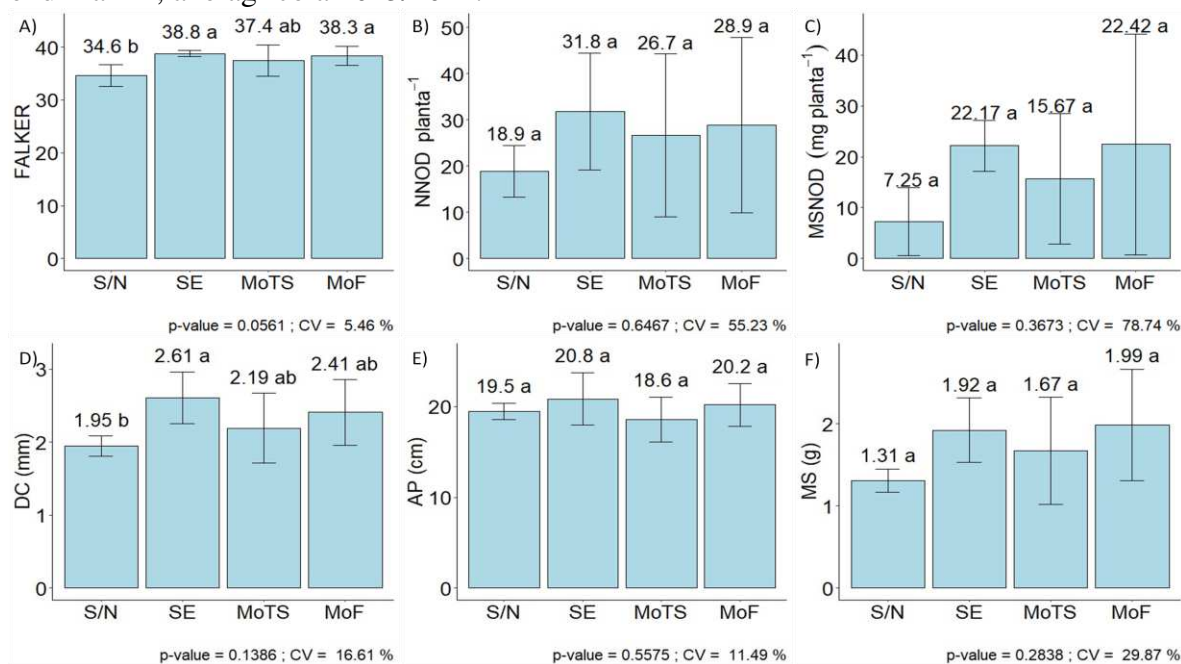
apresentaram desempenho inferior para semente sem nenhum tratamento com Mo (Figuras 3-6B, 3-6C, 3-6D, 3-6E e 3-6F, respectivamente). Para as sementes produzidas no ano agrícola 2022/2023, o índice de clorofila e o diâmetro do caule no florescimento foram inferiores para a semente sem nenhum tratamento com Mo (Figuras 3-7A e 3-7D); para o número de nódulos, massa seca de nódulos, altura de planta e massa seca de planta no florescimento, os tratamentos foram semelhantes (Figuras 3-7B, 3-7C, 3-7E e 3-7F, respectivamente). No ano agrícola 2022/2023, destaca-se que o crescimento e o desenvolvimento das plantas foram prejudicados, possivelmente devido às altas temperaturas no interior da casa de vegetação. Observou-se para as sementes produzidas no ano agrícola 2021/2022, que dos seis parâmetros avaliados, a semente sem nenhum tratamento com Mo apresentou desempenho inferior em cinco. Para as sementes produzidas no ano agrícola 2022/2023, dos seis parâmetros avaliados, a semente sem nenhum tratamento com Mo apresentou desempenho inferior em dois. Os demais tratamentos, para as sementes dos dois anos agrícolas, apresentaram de maneira geral desempenho semelhante, mostrando-se como opções para o fornecimento de Mo às sementes.

**Figura 3-6** - Avaliação do índice de clorofila falker (FALKER) (A), número de nódulos (NNOD) (B), massa seca de nódulos (MSNOD) (C), diâmetro do caule no florescimento (DC) (D), altura de planta no florescimento (AP) (E), e massa seca de planta no florescimento (MS) (F), para semente sem nenhum tratamento com Mo (S/N), semente enriquecida com 220,5 g ha<sup>-1</sup> Mo (SE), Mo no tratamento de sementes (MoTS), e aplicação de Mo foliar (MoF). Londrina-PR, ano agrícola 2022/2023.



**Figura 3-7** - Avaliação do índice de clorofila falker (FALKER) (A), número de nódulos (NNOD) (B), massa seca de nódulos (MSNOD) (C), diâmetro do caule no florescimento (DC) (D), altura de planta no florescimento (AP) (E), e massa seca de planta no florescimento (MS) (F), para semente sem nenhum tratamento com Mo (S/N), semente enriquecida com 220,5 g ha<sup>-1</sup> Mo (SE), Mo no tratamento de sementes (MoTS), e aplicação de Mo foliar (MoF). Londrina-PR, ano agrícola 2022/2023.

(F), para semente sem nenhum tratamento com Mo (S/N), semente enriquecida com 220,5 g ha<sup>-1</sup> Mo (SE), Mo no tratamento de sementes (MoTS), e aplicação de Mo foliar (MoF). Londrina-PR, ano agrícola 2023/2024.



Como discutido anteriormente, foi observado indicativo de melhoria da qualidade fisiológica das sementes enriquecidas, devido ao efeito isolado para comprimento de parte aérea de plântulas. Milani *et al.* (2010) avaliaram após enriquecimento, germinação, teste frio, índice de velocidade de emergência e condutividade elétrica, e Possenti e Villela (2010) avaliaram germinação e envelhecimento acelerado. Em ambos os trabalhos não foram observados resultados positivos nos testes realizados, corroborando em parte o presente trabalho, visto que foi observado efeito somente sobre o comprimento de parte aérea de plântulas. Entretanto, tal fato não exclui a adoção destas sementes como alternativa ao fornecimento de Mo, visto que se observou efeito pronunciado sobre a nodulação, índice de clorofila, e crescimento e desenvolvimento das plantas oriundas destas sementes, que apresentaram desempenho igual ou superior às plantas que receberam Mo no tratamento de sementes ou via foliar.

Os resultados obtidos no presente estudo enfatizam que a nodulação, o índice de clorofila, e o crescimento e desenvolvimento das plantas oriundas destas sementes são os maiores benefícios do enriquecimento com Mo, complementando as informações de estudos anteriores que trabalharam com enriquecimento e focaram somente em avaliar a qualidade fisiológica das sementes produzidas, e não observaram resultado significativo. Desta forma, ressaltando o trabalho realizado por Campo, Araújo e Hungria (2009), a adoção

de sementes enriquecidas com Mo pode possibilitar incremento em produtividade.

### 3.6 CONCLUSÕES

Os resultados evidenciam que ao utilizar as doses de Mo visando o enriquecimento de sementes, não houve alteração no crescimento e desenvolvimento da planta-mãe, assim como ausência de efeito negativo sobre a produtividade de sementes. O incremento de Mo nas sementes não foi observado com a aplicação em R1, porém foi linear com o aumento das doses em R5.2. O efeito positivo da aplicação de Mo sobre o teor de proteína e qualidade fisiológica das sementes foi variável entre anos agrícolas. Ressalta-se que houve melhoria na nodulação e índice de clorofila, e conseqüentemente, no crescimento e desenvolvimento das plantas oriundas das sementes enriquecidas com a dose de 220,5 g ha<sup>-1</sup> de Mo.

### 3.7 REFERÊNCIAS

ARACHCHIGE, P. S. P.; ROSSO, L. H. M.; HANSEL, F. D.; RAMUNDO, B.; TORRES, A. R.; ASEBEDO, R.; CIAMPITTI, I. A.; JAGADISH, S. V. K. Temporal biological nitrogen fixation pattern in soybean inoculated with *Bradyrhizobium*. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v. 3, n. 1, 10 p., 2020.

BENDER, R. R.; HAEGELE, J. W.; BELOW, F. E. Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern soybean varieties. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 2, p. 563-573, 2015.

BURSAKOV, S. A.; KROUPIN, P. Y.; KARLOV, G. I.; DIVASHUK, M. G. Tracing the element: the molecular bases of molybdenum homeostasis in legumes. **Agronomy**, v. 13, 24 p., 2023.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: MAPA/ACS, 2009. 395 p.

CAMPO, J. C.; ARAÚJO, R. S.; HUNGRIA, M. Molybdenum-enriched soybean seeds enhance N accumulation, seed yield, and seed protein content in Brazil. **Field Crops Research**, v. 110, p. 219-224, 2009.

CARDOSO, B. M.; LAZARINI, E.; MOREIRA, A.; MORAES, L. A. C.; SANTOS, F. L. D.; DAMETO, L. S. Effect of foliar molybdenum application on seed quality of soybean cultivars. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 52, n. 6, 2021.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **12º Levantamento - Safra 2023-24**: tabela de dados – produção e balanço de oferta e demanda de grãos. 2024.

Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>. Acesso em: 22/11/2024.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes**. 2. ed. Brasília, DF, 2009. 627 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF, 2018. 356 p.

FRANÇA-NETO, J. B.; KRZYZANOWSKI, F. C.; HENNING, A. A.; PÁDUA, G. P.; LORINI, I.; HENNING, F. A. **Tecnologia da produção de semente de soja de alta qualidade**. Londrina, PR: Embrapa Soja, 2016. (Documentos 380).

HEIL, C. Rapid, multi-component analysis of soybeans by FT-NIR Spectroscopy. **Madison: Thermo Fisher Scientific**, 2010. 3 p. (Application note: 51954). Disponível em: <https://nicoletcz.cz/userfiles/file/vjegy/soybeans.pdf>. Acesso em: 08/07/2024.

HENNING, L. M. M.; FERREIRA, L. C.; HENNING, F. A.; MANDARINO, J. M. G.; SANTOS, E. D.; OLIVEIRA, M. C. N. D.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N. Effect of water deficit-induced at vegetative and reproductive stages on protein and oil content in soybean grains. **Agronomy**, v. 8, n. 3, p. 1-11, 2018.

MARCOS FILHO, J. Teste de envelhecimento acelerado. *In*: KRZYZANOWSKI, F. C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA NETO, J. B. (Ed). **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES, 1999. p. 3.2-3.4.

MERCANTE, F. M.; HUNGRIA, M.; MENDES, I. C.; JÚNIOR, F. B. R. **Estratégias para aumentar a eficiência de inoculantes microbianos na cultura da soja**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2011. (Comunicado Técnico 169).

MILANI, G. L.; OLIVEIRA, J. A.; PEREIRA, E. M.; CARVALHO, B. O.; OLIVEIRA, G. E.; COSTA, R. R. Aplicação foliar de molibdênio durante a maturação de sementes de soja. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 4, p. 810-816, 2010.

MOREIRA, A.; CARDOSO, B. M.; DAMETO, L. S.; DELFIM, J.; MORAES, L. A. C.; LAZARINI, E. Molybdenum and nickel foliar application on soybean yield and oil and protein contents. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 59, e03728, 2024.

NAKAGAWA, J. Testes de vigor baseados no desempenho de plântulas. *In*: KRZYZANOWSKI, F. C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA NETO, J. B. (Ed). **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES, 1999. p. 2.1-2.24.

NAKAO, A. H.; VAZQUEZ, G. H.; OLIVEIRA, C. O.; SILVA, J. C.; SOUZA, M. F. P. Aplicação foliar de molibdênio em soja: efeitos na produtividade e qualidade fisiológica da semente. **Enciclopédia Biosfera**, v. 10, n. 18, p. 343-352, 2014.

NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; DA SILVA RICCE, W.; PINTO, L. F. D. **Atlas climático do estado do Paraná** (Recurso eletrônico). 2019. 210 p.

OLIVEIRA, C. O.; PINTO, C. C.; GARCIA, A.; BETTIOL, J. V. T.; DE SÁ, M. E.;

LAZARINI, E. Produção de sementes de soja enriquecidas com molibdênio. **Revista Ceres**, v. 64, n. 3, p. 282-290, 2017.

PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V. Calagem e adubação para as principais espécies oleaginosas e de feijão cultivadas no estado do Paraná. *In*: PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. 1. ed. Curitiba: Núcleo Estadual Paraná da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – NEPAR-SBCS, 2017. p. 215-219.

POSSENTI, J.; VILLELA, F. A. Efeito do molibdênio aplicado via foliar e via sementes sobre o potencial fisiológico e produtividade de sementes de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 32, n. 4, p. 143-150, 2010.

RANA, M. S.; BHATANA, P.; IMRAN, M.; SALEEM, M. H.; MOUSSA, M. G.; KHAN, Z.; KHAN, I.; ALAM, M.; ABBAS, M.; BINYAMIN, R.; AFZAL, J.; SYAIFUDIN, M.; DIN, I. U.; YOUNAS, M.; AHMAD, SHAH, M. A.; HU, C. Molybdenum potential vital role in plants metabolism for optimizing the growth and development. **Annals of Environmental Science and Toxicology**, v. 4, n. 1 p. 32-44, 2020.

RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; THOMPSON, H. E.; BENSON, G. O. **How a soybean plant develops**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1977. 20 p. (Special Report, 53).

SANTOS, M. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Microbial inoculants: reviewing the past, discussing the present and previewing an outstanding future for the use of beneficial bacteria in agriculture. **AMB Express**, v. 9, n. 205, 22 p. 2019.

SEMBA, R. D.; RAMSING, R.; RAHMAN, N.; KRAEMER, K.; BLOEM, M. W. Legumes as a suitable source of protein in human diets. **Global Food Security**, v. 28, p. 1-19, 2021.

SFREDO, G. J.; OLIVEIRA, M. C. N. **Soja: molibdênio e cobalto**. Londrina: Embrapa Soja, 2010. (Documentos 322).

SHIMIZU, G. D.; MARUBAYASHI, R. Y. P.; GONÇALVES, L. S. A. **AgroR**: Experimental Statistics and Graphics for Agricultural Sciences. R package version 1.3.6. 2024. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/AgroR/index.html>

SIEGBAHN, P. E. M. The mechanism for nitrogenase including all steps. **Physical Chemistry Chemical Physics**, v. 21, p. 15747-15759, 2019.

TAGLIAPIETRA, E. L.; ZANON, A. J.; STRECK, N. A.; BALEST, D. S.; ROSA, S. L.; BEXAIRA, K. P.; RICHTER, G. L.; RIBAS, G. G.; SILVA, M. R. Biophysical and management factors causing yield gap in soybean in the subtropics of Brazil. **Agronomy Journal**, v. 113, p. 1-13, 2021.

TELLES, T. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Economic value of biological nitrogen fixation in soybean crops in Brazil. **Environmental Technology & Innovation**, v. 31, p. 1-10, 2023.

## 4 ARTIGO B: PRODUÇÃO E COMPOSIÇÃO DE SEMENTES DE SOJA ENRIQUECIDAS COM COBALTO, MOLIBDÊNIO E NÍQUEL

### 4.1 RESUMO

Cobalto (Co) e molibdênio (Mo) são nutrientes essenciais para a fixação biológica de nitrogênio (FBN) na soja e podem ser fornecidos via sementes enriquecidas, que são obtidas através de aplicação foliar durante a fase de maturação em campos de produção de sementes. O níquel (Ni) também é um nutriente essencial para a FBN, porém não há relatos de sua aplicação visando fornecê-lo associado a Co e Mo por enriquecimento de sementes. Ao adotar esta prática, em função de aumentar o teor de tais nutrientes nas sementes, suspeita-se que possa haver alteração nos teores de óleo, proteína e de ácidos graxos nas mesmas, o que precisa ser avaliado para o melhor entendimento da qualidade fisiológica das sementes produzidas, assim como do desempenho das plantas oriundas destas sementes. Neste sentido, objetivou-se avaliar o efeito da aplicação foliar de Co e Mo associados a doses de Ni para enriquecimento sobre os componentes de produção e produtividade de sementes da planta-mãe; e teores de elementos químicos, óleo, proteína e ácidos graxos das sementes produzidas. Foi conduzido experimento em vasos em delineamento inteiramente casualizado, com cinco repetições. As fontes de nutrientes foram, sulfato de cobalto (21%), molibdato de sódio (39%) e sulfato de níquel (22%), que compuseram sete tratamentos, aplicados via foliar no estágio fenológico R5.2: controle; CoMo em dose fixa (DF) (40/400 g ha<sup>-1</sup> Co/Mo); CoMo em DF + 20 g ha<sup>-1</sup> Ni; CoMo em DF + 40 g ha<sup>-1</sup> Ni; CoMo em DF + 60 g ha<sup>-1</sup> Ni; CoMo em DF + 80 g ha<sup>-1</sup> Ni; CoMo em DF + 100 g ha<sup>-1</sup> Ni. Foram avaliados: índice de clorofila; desempenho fitométrico e produtivo da planta-mãe; teores de elementos químicos, óleo, proteína e ácidos graxos nas sementes produzidas. Ao utilizar as doses de Co (40 g ha<sup>-1</sup>), Mo (400 g ha<sup>-1</sup>) e Ni (até 100 g ha<sup>-1</sup>) no estágio fenológico R5.2 para enriquecimento de sementes, não houve prejuízo ao crescimento e desenvolvimento da planta-mãe, assim como à produtividade das sementes produzidas. Somado a isso, destaca-se que houve enriquecimento das sementes com os três elementos, principalmente com níquel, e que não houve efeito negativo sobre os teores de óleo, proteína e ácidos graxos.

**Palavras chave:** *Glycine max* (L.) Merrill; enriquecimento de sementes; produtividade de sementes; óleo e proteína; ácidos graxos.

## PRODUCTION AND COMPOSITION OF SOYBEAN SEED ENRICHED WITH COBALT, MOLYBDENUM AND NICKEL

### 4.2 ABSTRACT

Cobalt (Co) and molybdenum (Mo) are nutrients needed to biological nitrogen fixation (BNF) in soybean and may be provided through enriched seed, which are obtained through foliar application at the beginning of its formation in seed production fields. The element nickel (Ni) is also needed to BNF, although there is no report of its use aiming to provide it together with Co and Mo through enriched seed. By adopting this practice, due to increase the content of such nutrients in the seed, it is suspected that it might be alteration in oil, protein and fatty acid contents in these seed, which need to be assessed for a better understanding of physiological quality of the seed produced, as well as the development of plants derived of these seed. Based on that, it was aimed to assess the effect of Co and Mo foliar application associated to doses of Ni for seed enrichment over yield components and yield of the mother-plant; and contents of chemical elements, oil, protein and fatty acids in the seed produced. It was carried out an experiment in pot in randomized design, with five repetitions. The sources of nutrients were, cobalt sulphate (21%), sodium molybdate (39%) and nickel sulphate (22%), which comprised seven treatments, foliar applied in R5.2 growth stage: control; CoMo in fixed rate (FR) (40/400 g ha<sup>-1</sup> Co/Mo); CoMo in FR + 20 g ha<sup>-1</sup> Ni; CoMo in FR + 40 g ha<sup>-1</sup> Ni; CoMo in FR + 60 g ha<sup>-1</sup> Ni; CoMo em FR + 80 g ha<sup>-1</sup> Ni; CoMo em FR + 100 g ha<sup>-1</sup> Ni. It were assessed: chlorophyll index, biometric and yield performance of the mother-plant; content of chemical elements, oil, protein and fatty acids in the seed produced. By utilizing the doses of Co (40 g ha<sup>-1</sup>), Mo (400 g ha<sup>-1</sup>) and Ni (up to 100 g ha<sup>-1</sup>) in R5.2 growth stage for seed enrichment, there was no harm over growing and development of the mother-plant, as well as yield of seed produced. Added to that, it is highlighted that there was enrichment of seed with the three elements, mainly with nickel, and that there was no negative effect over oil, protein and fatty acid contents.

**Keywords:** *Glycine max* (L.) Merrill; seed enrichment; seed yield; oil and protein; fatty acid.

### 4.3 INTRODUÇÃO

A produtividade média brasileira de soja tem potencial para ser duplicada adotando-se melhores práticas de manejo, destacando-se nesse contexto a inoculação de sementes com bactérias do gênero *Bradyrhizobium* (BATTISTI *et al.*, 2018). Estas são responsáveis pelo processo de FBN, macronutriente demandado em maior quantidade pela cultura, na ordem de 80 kg N por tonelada de grãos produzida (BENDER; HAEGELE; BELOW, 2015).

Este processo é caracterizado pela conversão do N de sua forma molecular ( $N_2$ ) altamente estável devido sua tripla ligação covalente, e redução à amônia ( $NH_3$ ), forma assimilável pelas plantas. Durante o processo de FBN é desejado que as bactérias apresentem a máxima eficiência possível, o que demanda a presença dos nutrientes Co, Mo e Ni visto desempenharem funções específicas em determinadas etapas metabólicas (PRASAD; SHIVAY, 2020; RANA *et al.*, 2020; HU *et al.*, 2021).

As primeiras pesquisas trabalharam com fornecimento de Co e Mo via tratamento de sementes, entretanto existia a preocupação de os nutrientes, devido à salinidade, prejudicarem as bactérias fixadoras. Neste sentido, buscou-se uma alternativa a esta prática tentando enriquecer as sementes em campos de produção de sementes, através de aplicação foliar na planta-mãe, inicialmente com Mo (CAMPO *et al.*, 2009), e mais tarde com Co e Mo de forma conjunta (CORTESE *et al.*, 2019), com resultados positivos e sem interferência sobre a produtividade.

Apesar de ser possível o enriquecimento de sementes, o fornecimento desses nutrientes via tratamento de sementes ainda é uma realidade. Atenção deve ser dada, ao fato de que o nutriente Ni também tem sido empregado junto a Co e Mo no tratamento de sementes, o que pode potencializar o efeito salino às bactérias. Assim, foi levantada a possibilidade de enriquecê-lo na semente junto a Co e Mo através de aplicação foliar na planta-mãe, o que já é mostrado ser possível, somente com Ni, por Barcelos *et al.* (2018).

Entretanto, não há relatos na literatura sobre a realização desta prática, portanto, a determinação da melhor dose de Ni é necessária, o que envolve a realização de avaliações na planta-mãe e nas sementes produzidas após aplicação para enriquecimento. De acordo com Marcos Filho (2015), alterações no ambiente de produção podem modificar a composição das sementes e assim, comprometer o metabolismo, e conseqüentemente, o potencial fisiológico das sementes produzidas. Desta forma, é importante a quantificação de alterações na composição das sementes após aplicação para enriquecimento.

Neste sentido, objetivou-se avaliar o efeito da aplicação foliar de Co e Mo associados a doses de Ni para enriquecimento sobre os componentes de produção e produtividade de sementes da planta-mãe; e teores de elementos químicos, óleo, proteína e ácidos graxos das sementes produzidas.

#### 4.4 MATERIAL E MÉTODOS

##### 4.4.1 Descrição do Local Experimental

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, sob coordenadas geográficas (23°19'44"S, 51°12'13"O). O solo utilizado para preenchimento dos vasos é classificado como Latossolo Vermelho (EMBRAPA, 2018), e foi analisado anteriormente para caracterização dos atributos químicos (Tabela 4-1).

**Tabela 4-1** - Atributos químicos do solo utilizado para preenchimento dos vasos utilizados, para o cultivo das plantas que receberam aplicação de CoMoNi em R5.2 visando o enriquecimento de sementes. Londrina-PR, 2022.

<b>pH CaCl<sub>2</sub></b>	<b>H+Al</b>	<b>Al<sup>+3</sup></b>	<b>Ca<sup>+2</sup></b>	<b>Mg<sup>+2</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>	<b>P</b>	<b>Cu<sup>+2</sup></b>
-----				-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----		-----mg dm <sup>-3</sup> -----	
5,01	5,11	0,00	1,58	0,59	0,03	1,42	4,72
<b>Fe<sup>+2</sup></b>	<b>Mn<sup>+2</sup></b>	<b>Zn<sup>+2</sup></b>	<b>Mo</b>	<b>CTC efetiva</b>	<b>CTC pH 7,0</b>	<b>SB</b>	<b>V</b>
-----mg dm <sup>-3</sup> -----				-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----		-----%	
122,14	82,85	0,38	0,00	2,21	7,32	2,20	30,0

<sup>1</sup>Mo: molibdênio; CTC: capacidade de troca de cátions; SB: soma de bases; V%: saturação de bases.

##### 4.4.2 Delineamento Experimental e Tratamentos Empregados

O delineamento foi inteiramente casualizado com cinco repetições, composto de sete tratamentos: T1 (controle); T2 (40/400 g ha<sup>-1</sup> Co/Mo); T3 (40/400 g ha<sup>-1</sup> Co/Mo + 20 g ha<sup>-1</sup> Ni); T4 (40/400 g ha<sup>-1</sup> Co/Mo + 40 g ha<sup>-1</sup> Ni); T5 (40/400 g ha<sup>-1</sup> Co/Mo + 60 g ha<sup>-1</sup> Ni); T6 (40/400 g ha<sup>-1</sup> Co/Mo + 80 g ha<sup>-1</sup> Ni); e T7 (40/400 g ha<sup>-1</sup> Co/Mo + 100 g ha<sup>-1</sup> Ni). Foram utilizados como fonte dos nutrientes: sulfato de cobalto (21%); molibdato de sódio (39%); e sulfato de níquel (22%).

##### 4.4.3 Implantação e Condução

Após análise dos atributos químicos do solo, foram realizadas a calagem e a adubação de base em volume de solo pré-determinado para o total de vasos a serem utilizados, considerando-se vasos com volume de cinco litros. Para calagem, utilizou-se calcário calcítico, visando-se elevar a saturação de bases a 60%. Para adubação, tomou-se como referência a produtividade almejada de quatro t ha<sup>-1</sup> (PAULETTI; MOTTA, 2017), e as quantidades aplicadas foram: 25 kg ha<sup>-1</sup> N e 120 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, utilizando-se o fertilizante MAP (11-52-00); e 130 kg ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O, utilizando-se o fertilizante cloreto de potássio (60% de K<sub>2</sub>O).

Para semeadura, foram utilizadas sementes da cultivar 64I63 RSF IPRO, de ciclo indeterminado e grupo de maturação 6.4. As sementes foram tratadas previamente [(SC de clorantraniliprole - 625 g L<sup>-1</sup> - dose de 1 mL kg<sup>-1</sup>) + (SC de Fludioxonil - 25 g L<sup>-1</sup> + Metalaxyl - 10 g L<sup>-1</sup> - dose de 1 mL kg<sup>-1</sup>) + (SC de Tiametoxam - 350 g L<sup>-1</sup> - dose de 2 mL kg<sup>-1</sup>)]. No momento da semeadura, as sementes foram inoculadas com inoculante líquido contendo bactérias de *Bradyrhizobium japonicum* (5.10<sup>9</sup> UFC mL<sup>-1</sup>), utilizando-se 3 mL kg<sup>-1</sup> de sementes (dose duplicada em função de solo de encosta).

De acordo com a escala fenológica de Ritchie *et al.* (1977), após a emergência e estabelecimento das plantas, no estágio fenológico VC, foi realizado desbaste, deixando-se três plantas por vaso, e no estágio fenológico R5.2, foi realizada a aplicação foliar dos tratamentos. Foi utilizando pulverizador costal elétrico, composto de barra de pulverização de quatro pontas espaçadas de 0,32 m, ajustado para volume de calda de 175 L ha<sup>-1</sup>. Junto aos tratamentos, foi adicionado espalhante adesivo na dose de 1 mL L<sup>-1</sup>. Foi realizado o monitoramento de pragas e doenças, procedendo-se o manejo quando necessário.

#### 4.4.4 Avaliações Realizadas

O índice de clorofila foi avaliado no nono dia após aplicação dos tratamentos, objetivando-se avaliar além do índice, uma possível fitotoxicidez. Foram tomados nas três plantas de cada repetição o terceiro trifólio aberto do ápice para a base da planta, realizando-se a aferição no folíolo central. Para aferição, utilizou-se um Medidor Eletrônico de Teor de Clorofila da marca Falker (clorofiLOG - CFL1030).

O diâmetro do caule e a altura de planta foram tomados nas três plantas de cada repetição após corte rente ao solo na colheita. O diâmetro foi tomado logo abaixo do primeiro nó visível, no sentido do menor diâmetro, sendo a aferição realizada com auxílio de paquímetro digital. A altura foi tomada medindo-se o comprimento da base ao topo da haste

principal, com auxílio de trena graduada.

Para avaliação dos componentes de produção, foram colhidas todas as vagens das três plantas de cada repetição e quantificadas. A seguir, essas foram debulhadas, sendo quantificados o número e a massa de sementes totais, com expressão dos resultados por planta.

Os teores dos elementos químicos nas sementes foram determinados agrupando-se as amostras de cada repetição, sendo que estas formaram uma amostra composta por tratamento. Estas amostras foram analisadas segundo a metodologia proposta pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2009).

Os teores de óleo, proteína e de ácidos graxos foram determinados em sementes íntegras pela técnica da Refletância do Infravermelho Próximo (NIR), conforme descrito por Heil (2010). As sementes inteiras e limpas foram submetidas às leituras, em equipamento da marca Thermo, modelo Antaris II, dotado de esfera de integração com resolução de  $4 \text{ cm}^{-2}$ , média de 32 scans e background a cada leitura. Para predição, foram utilizados modelos matemáticos desenvolvidos pela Embrapa Soja.

#### 4.4.5 Análise dos Dados

O controle não foi comparado aos demais tratamentos, ele foi exposto nas tabelas somente para efeito de observação. Para o desempenho fitométrico, produtivo, teores de óleo, proteína e de ácidos graxos, os dados foram testados para normalidade dos erros (teste de Shapiro-Wilk), homogeneidade de variâncias (teste de Bartlett) e independência dos erros (teste de Durbin-Watson); posteriormente, foram submetidos à análise de variância para delineamento inteiramente casualizado. Para análise dos teores dos elementos químicos nas sementes, em função do agrupamento das repetições, os dados foram plotados e depois realizada análise de regressão, optando-se pelo modelo matemático que melhor se ajustou ao conjunto de dados, com base na significância do  $p$  valor e também no maior  $R^2$ . Em todas as análises foi adotado o nível de probabilidade de erro de 5%, exceto para os teores dos elementos químicos nas sementes, que foi adotado 10%. Todas as análises foram executadas através do programa computacional R, utilizando-se o pacote AgroR (SHIMIZU; MARUBAYASHI; GONÇALVES, 2024).

#### 4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observando-se a Tabela 4-2, pode-se notar que não houve alteração no índice de clorofila em função dos tratamentos empregados. A clorofila é um pigmento fotossintético de fundamental importância para fotossíntese, responsável por converter a energia solar em energia química que será utilizada para a síntese de moléculas de carboidratos, que serão utilizados como fonte de energia pelas plantas (PAREEK *et al.*, 2017). Assim, observa-se que a aplicação dos nutrientes não favoreceu e nem prejudicou a atividade fotossintética. Einhardt *et al.* (2021), ao testarem doses de Ni via folha em V4, estágio fenológico de aplicação anterior ao do presente estudo, o que deve ser considerado para fazer esta relação, observaram que o teor de clorofila foi superior ao controle até a dose de 60 g ha<sup>-1</sup> Ni, porém observaram toxidez a partir de 120 g ha<sup>-1</sup> Ni, destacando danos à fotossíntese.

Para diâmetro do caule, altura de planta, número de vagens e de sementes por planta, não foram observadas diferenças significativas em função dos tratamentos, ou seja, os nutrientes não prejudicaram o desenvolvimento da soja, que neste caso em específico, possui hábito de crescimento indeterminado. A aplicação foi realizada no estágio fenológico R5.2, e neste estágio não há grande potencial para efeito positivo sobre a estrutura da planta e os componentes de produção, visto que a soja atinge seu máximo crescimento em altura, número de nós e área foliar próximo ao estágio fenológico R5.5 (RITCHIE *et al.* 1977). Em se tratando da produtividade, avaliada pela massa de sementes por planta, também não foi constatado efeito dos tratamentos, indicando que o enchimento de sementes não foi prejudicado, confirmando a ausência de fitotoxicidade em função das doses de níquel (Tabela 4-2).

**Tabela 4-2** - Valores do controle e resumo da análise de variância contendo as significâncias (*p* valor) para índice de clorofila falker, desempenho fitométrico e de componentes de produção, e produtividade de sementes de soja após aplicação foliar de CoMo e de CoMoNi em R5.2 visando o enriquecimento das sementes durante a produção. Londrina-PR, 2023.

TRAT <sup>(1)</sup>	FALKER	DC	APL	VGPL	NSPL	MSPL
	-----	---mm---	---cm---	---n°---	---n°---	---g---
<b>Controle</b>	38,3	2,50	64	18	37	5,68
<b>CoMo</b>	37,6	2,48	61	15	33	4,84
<b>CoMo + D1Ni</b>	37,7	2,59	64	18	37	5,08
<b>CoMo + D2Ni</b>	38,9	2,45	62	15	32	5,03
<b>CoMo + D3Ni</b>	41,7	2,85	63	19	39	5,50
<b>CoMo + D4Ni</b>	39,3	2,45	60	14	29	4,63
<b>CoMo + D5Ni</b>	38,3	2,55	68	19	40	6,13
<b><i>p</i> valor</b>	0,0847	0,1212	0,2895	0,1689	0,2678	0,3890

<sup>(1)</sup>CoMo: cobalto e molibdênio; D1Ni: dose um de níquel; D2Ni: dose dois de níquel; D3Ni: dose três de níquel; D4Ni: dose quatro de níquel; D5Ni: dose cinco de níquel; FALKER: índice de clorofila; DC: diâmetro do caule; APL: altura de planta; VGPL: n° de vagens por planta; NSPL: n° de sementes por planta; MSPL: massa de sementes por planta. Significativo a 1% de probabilidade (*p*<0,01); significativo a 5% de probabilidade (*p*<0,05).

Na Tabela 4-3, observa-se que não houve influência dos tratamentos sobre os teores de óleo e proteína, e também sobre os teores de ácido palmítico, esteárico, oleico, linoleico e linolênico. Alterações nestas características estão mais relacionadas, por exemplo, à exposição das plantas a diferentes faixas de temperatura durante a formação da semente (ALSAJRI *et al.*, 2020). Portanto, nota-se que o enriquecimento com os nutrientes até os teores em que foram obtidos não apresentou resultado negativo às características analisadas. Ainda, ressalta-se a importância de se avaliar estas características visto que podem influenciar o desempenho das sementes, o que precisa ser comprovado em estudos futuros. Bellaloui *et al.* (2017) e Capelin *et al.* (2021) observaram correlação significativa positiva entre germinação e envelhecimento acelerado com teor de proteína, e correlação negativa significativa com teor de óleo.

**Tabela 4-3** - Valores do controle e resumo da análise de variância contendo as significâncias (*p* valor) referentes aos teores de proteína, óleo e ácidos graxos de sementes de soja, após aplicação foliar de CoMo e CoMoNi em R5.2 visando enriquecimento das sementes durante a produção. Londrina-PR, 2023.

TRAT <sup>(1)</sup>	Proteína	Óleo	Ácido palmítico	Ácido esteárico	Ácido oleico	Ácido linoleico	Ácido linolênico
	%	%	%	%	%	%	%
<b>Controle</b>	39,90	21,59	12,66	2,64	19,18	64,77	8,31
<b>CoMo</b>	38,15	22,75	12,70	2,79	18,37	64,48	8,65
<b>CoMo + D1Ni</b>	38,73	22,36	12,57	2,70	18,30	65,45	8,63
<b>CoMo + D2Ni</b>	37,94	22,80	12,45	2,69	20,26	62,44	8,49
<b>CoMo + D3Ni</b>	40,71	21,47	11,73	2,58	23,04	61,94	8,65
<b>CoMo + D4Ni</b>	39,58	22,06	12,45	2,71	22,75	63,11	8,31
<b>CoMo + D5Ni</b>	39,10	22,29	12,57	2,82	20,19	65,12	7,88
<b><i>p</i> valor</b>	0,0716	0,2498	0,1606	0,7224	0,6648	0,2576	0,8313

<sup>(1)</sup>CoMo: cobalto e molibdênio; D1Ni: dose um de níquel; D2Ni: dose dois de níquel; D3Ni: dose três de níquel; D4Ni: dose quatro de níquel; D5Ni: dose cinco de níquel. Significativo a 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ); significativo a 5% de probabilidade ( $p < 0,05$ ).

Nota-se que os teores de Co e Mo quando aplicados em conjunto (CoMo), aumentaram em relação ao controle sem aplicação, mostrando que o enriquecimento com os dois nutrientes foi efetivo. O teor de Co aumentou de 0,16 para 1,25 mg kg<sup>-1</sup> de matéria seca (MS), ao passo que o de Mo aumentou de 1,68 para 24,85 mg kg<sup>-1</sup> MS (Tabela 4-4). Cortese *et al.* (2019) e Abreu-Junior *et al.* (2023) também relataram a possibilidade de enriquecimento de sementes de soja com Co e Mo. Quando Co e Mo foram associados a Ni, continuou-se observando o enriquecimento com ambos os nutrientes, e ao mesmo tempo observou-se o enriquecimento com Ni, sendo seu teor nas sementes aumentado de maneira linear (Figura 4-

1D), conforme o aumento das doses do nutriente aplicadas. O controle sem aplicação se encontrava com teor de Ni de 2,00 mg kg<sup>-1</sup> MS, ao passo que a aplicação da dose máxima de Ni resultou no teor de 10,91 mg kg<sup>-1</sup> MS. Barcelos *et al.* (2018) ao aplicarem a dose de Ni de 100 g ha<sup>-1</sup>, associada a fungicida, observaram o acúmulo de Ni de 18 mg kg<sup>-1</sup> MS nas sementes.

Considerando-se uma situação hipotética em que a densidade desejada seja de 250 mil plantas por hectare, a massa de mil sementes de 160 g, e a germinação de 100%, chega-se a quantia de 40 quilos de sementes de soja necessárias para implantação de um hectare. Os teores máximos de Co, Mo e Ni nas sementes enriquecidas, considerando-se a dose máxima de Ni, foram de 1,29, 27,31 e 10,91 mg kg<sup>-1</sup> MS, respectivamente (Tabela 4-4). Ao multiplicar-se esses valores por 40, obtém-se as quantias de 51,6, 1092,4 e 436,4 mg ha<sup>-1</sup>, de Co, Mo e Ni, respectivamente. Estas quantias são inferiores as quantias empregadas para tratamento de sementes, 2 a 3 g ha<sup>-1</sup> Co, 12 a 25 g ha<sup>-1</sup> Mo e 2,5 g ha<sup>-1</sup> Ni (SFREDO; OLIVEIRA, 2010; RODAK *et al.*, 2024), entretanto, é importante ressaltar que são menos suscetíveis a perdas por lixiviação que podem ocorrer após a semeadura, em função de já estarem sendo fornecidas dentro das sementes.

Apesar de a aplicação ter sido realizada via folha, discute-se sobre o acúmulo dos nutrientes observado, de acordo com Andresen, Peiter e Küpper (2018), que como as plantas são seres imóveis, elas não podem escapar de altas concentrações de metais no solo, então, um mecanismo comum que adotam para contornar tais situações é o sequestro e armazenamento de metais tóxicos em compartimentos como o vacúolo, onde interferem o mínimo possível em processos metabólicos, como respiração e fotossíntese. Essa é uma característica comum de plantas hiperacumuladoras, que acumulam um ou mais metais em seus tecidos como forma de se protegerem contra o ataque de patógenos. Ferreira *et al.* (2020) observaram que plantas de soja oriundas de sementes enriquecidas com Ni apresentaram maior tolerância à doença ferrugem asiática.

Conforme se aumentaram os teores de Ni via aplicação foliar, houve aumento nos teores de sódio (Na) e Mo, e redução nos teores de Cu, Fe, Si e Al nas sementes (Tabela 4-4 e Figura 4-1). Na, Si e Al são classificados como elementos benéficos para as plantas, assim como Co, ou seja, estimulam o crescimento, mas não são essenciais ao desenvolvimento, ou são somente para algumas espécies de plantas. Fe e Cu são classificados como nutrientes essenciais, ou seja, as plantas não são capazes de completar o ciclo na sua ausência; sua função não pode ser desempenhada pela substituição por outro nutriente; e devem estar diretamente envolvidos no metabolismo da planta (KIRKBY, 2012).

O teor de Fe no controle se encontrava em 130,41 mg kg<sup>-1</sup> MS, com aplicação de CoMo, foi reduzido para 84,24, e com aplicação de CoMo associado à dose máxima de Ni, foi reduzido para 69,48 mg kg<sup>-1</sup> MS (Tabela 4-4). Na FBN, tanto a leghemoglobina quanto a nitrogenase necessitam de Fe. O Fe se liga ao oxigênio e o transporta à leghemoglobina; e na nitrogenase, atua como transportador de elétrons. Desta forma, a FBN não consegue ser realizada na ausência de Fe (MERRY *et al.*, 2021).

O teor de Cu no controle se encontrava em 26,12 mg kg<sup>-1</sup> MS, com aplicação de CoMo, foi reduzido a 11,39 mg kg<sup>-1</sup> MS, e com aplicação de CoMo associado à dose máxima de Ni, foi reduzido para 6,92 mg kg<sup>-1</sup> MS (Tabela 4-4). Na FBN, o Cu é cofator de alguns dos citocromos de alta afinidade que medeiam a transdução de energia nos bacterióides. Além do que, é parte de vários sistemas superóxido dismutase que detoxificam radicais livres, que são subprodutos do processo de FBN (GONZÁLEZ-GUERRERO *et al.*, 2014).

A explicação para esse comportamento dos nutrientes se baseia no fato de que estes são transportados através da membrana celular por proteínas de transporte altamente específicas, entretanto, nem todas estas proteínas são altamente específicas, de modo que íons com propriedades químicas similares compartilham algumas rotas de transporte (ANDRESEN; PEITER; KÜPPER, 2018). Compostos solubilizados de Ni podem ser transportados por vários transportadores de cátions, como os de Fe<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>, Cu<sup>+2</sup> e Zn<sup>+2</sup> (VATANSEVER *et al.*, 2017). Neste sentido, ocorre que, o que determina quais dos íons com propriedades similares irá ser absorvido é a sua concentração, sendo o presente em maior concentração absorvido e o presente em menor concentração inibido, fenômeno conhecido como inibição competitiva (SILVA; TREVIZAM, 2015).

Ressalta-se, que quando expostas a altas concentrações de metais pesados, as plantas podem apresentar sintomas de fitotoxicidez, como crescimento retardado, clorose e até mesmo a morte (GHORI *et al.*, 2019), entretanto, tais sintomas não foram observados após aplicação dos nutrientes para enriquecimento. Porém, como já destacado, observaram-se alterações nos teores de alguns nutrientes nas sementes analisadas (Tabela 4-4). Essas alterações estão relacionadas às interações sinérgicas e antagônicas entre os nutrientes (RIETRA *et al.*, 2017), e é importante verificar em estudos futuros, o equilíbrio nutricional nas folhas da planta-mãe após aplicação na fase de maturação, visando-se estabelecer limites de doses a serem aplicadas.

É importante verificar também, se as alterações nos teores dos nutrientes influenciam a qualidade fisiológica das sementes produzidas, se causam deficiência

nutricional às plântulas recém emergidas, se influenciam a FBN, e se influenciam o desempenho das plantas oriundas destas sementes. Além disso, é importante avaliar se estas plantas irão produzir sementes com algum resquício destes nutrientes, para que seja avaliada a eficácia da adoção desta prática em campos de produção de sementes. Como ponto adicional, é importante verificar se estas plantas serão mais tolerantes às doenças que acometem a cultura em função da aplicação de Ni, como destacado nos trabalhos de Barcelos *et al.* (2018) para oídio, de Ferreira *et al.* (2020) para ferrugem, e de Fontes *et al.* (2024) para mofo branco. Em caso de resultado satisfatório, faz-se necessário a determinação de até qual teor de cada nutriente na semente há retorno tanto do desempenho fitotécnico quanto econômico.

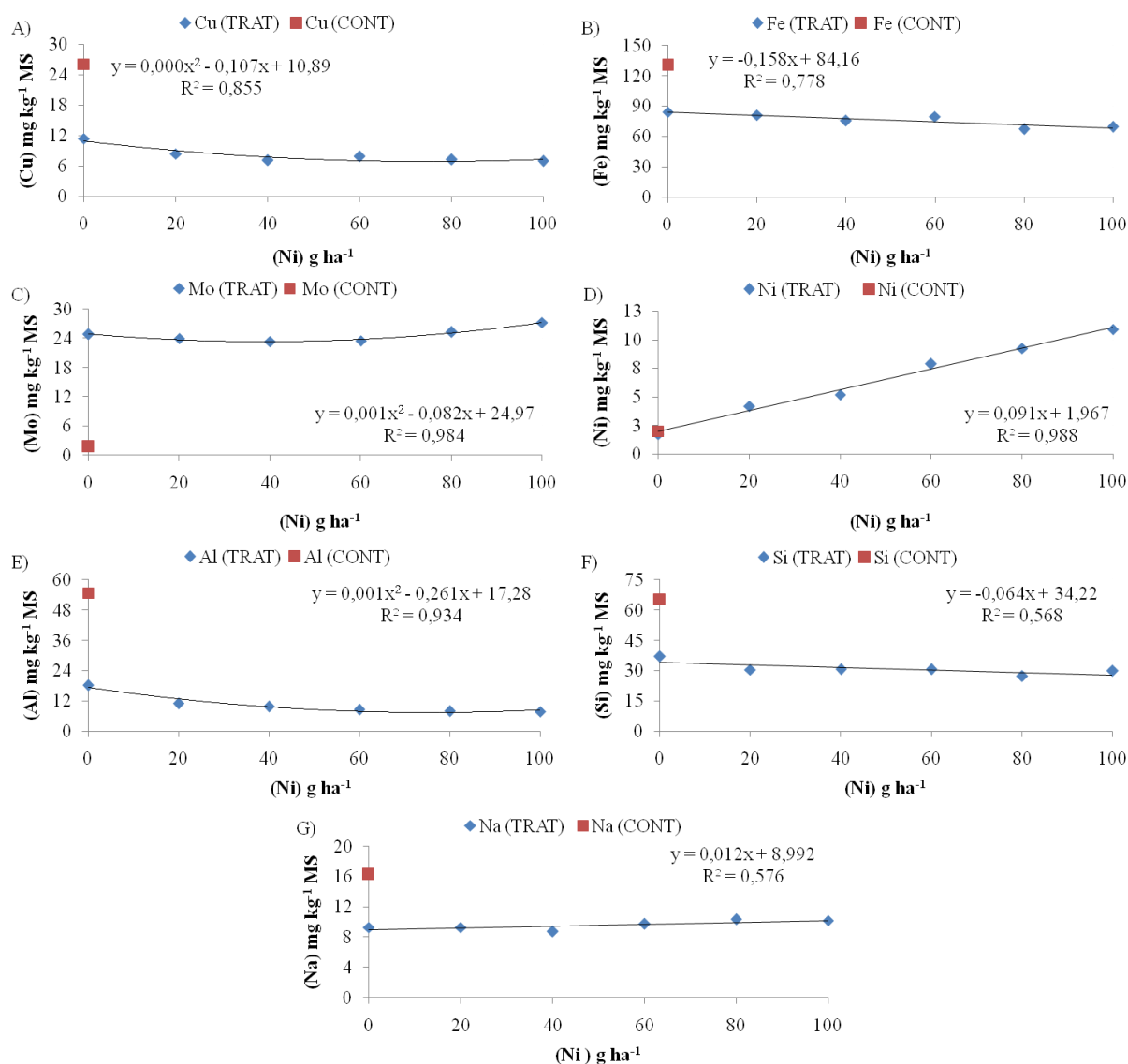
O enriquecimento de sementes com CoMoNi através de aplicação foliar única durante a maturação das sementes, confirmado ser possível de acordo com os resultados obtidos no presente estudo, mostra-se como alternativa adicional ao fornecimento via tratamento de sementes, o que diminuiria danos ou até mesmo morte das bactérias veiculadas via inoculante, devido à redução do efeito salino. Somado a isso, pode ser que seja uma maneira mais eficiente de fornecê-los, uma vez que os nutrientes já se encontram dentro da semente, estando prontamente disponíveis no momento em que forem demandados durante o processo de FBN.

**Tabela 4-4** - Significância do ajuste da regressão (*p* valor) para os elementos químicos analisados em função da aplicação foliar de CoMo e CoMoNi em R5.2 visando o enriquecimento das sementes de soja durante a produção. Londrina-PR, 2023.

Dose <sup>(1)</sup>	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
g ha <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup> MS						mg kg <sup>-1</sup> MS				
Controle	32,72	2,27	12,17	4,54	1,95	2,10	18,42	26,12	130,41	36,17	33,19
CoMo	37,44	2,30	12,87	3,82	1,91	2,17	18,11	11,39	84,24	35,89	31,11
CoMo + D1Ni	34,38	2,38	12,59	3,87	1,89	2,14	17,96	8,39	81,27	37,87	33,35
CoMo + D2Ni	34,99	2,22	12,61	3,76	1,85	2,07	19,36	7,10	75,30	32,44	30,67
CoMo + D3Ni	39,19	2,63	11,56	3,87	1,84	2,10	19,02	7,86	79,69	34,87	32,30
CoMo + D4Ni	39,19	2,44	13,21	3,71	1,90	2,17	19,18	7,23	67,36	37,04	28,37
CoMo + D5Ni	39,02	2,37	13,22	3,74	1,88	2,16	17,65	6,92	69,48	36,29	28,89
<i>p</i> valor	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,055 <sup>(Q)</sup>	0,020 <sup>(L)</sup>	ns	ns
Dose	Mo	Ni	Al	Co	Se	Si	Na	V	Cd	Pb	Cr
g ha <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup> MS										
Controle	1,68	2,00	54,77	0,16	4,52	65,40	16,26	0,59	0,03	0,05	1,54
CoMo	24,85	1,72	18,24	1,25	3,07	37,01	9,30	0,04	0,00	0,02	1,41
CoMo + D1Ni	23,98	4,20	10,97	1,29	3,76	30,45	9,31	0,04	0,02	0,00	1,32
CoMo + D2Ni	23,38	5,18	9,72	1,26	3,25	30,63	8,75	0,08	0,01	0,01	1,30
CoMo + D3Ni	23,56	7,90	8,51	1,60	3,67	30,67	9,72	0,07	0,03	0,00	1,37
CoMo + D4Ni	25,30	9,26	7,94	1,17	2,52	27,30	10,32	0,00	0,00	0,00	1,39
CoMo + D5Ni	27,31	10,91	7,87	1,29	3,23	29,82	10,20	0,00	0,00	0,12	1,38
<i>p</i> valor	0,003 <sup>(Q)</sup>	0,000 <sup>(L)</sup>	0,018 <sup>(Q)</sup>	ns	ns	0,083 <sup>(L)</sup>	0,079 <sup>(L)</sup>	ns	ns	ns	ns

<sup>(1)</sup>CoMo: cobalto e molibdênio; D1Ni: dose um de níquel; D2Ni: dose dois de níquel; D3Ni: dose três de níquel; D4Ni: dose quatro de níquel; D5Ni: dose cinco de níquel. <sup>(L)</sup>: ajuste linear; <sup>(Q)</sup>: ajuste quadrático. Determinação de N: por espectrofotometria. Determinação de P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn, Mo, Ni, Al, Co, Se, Si, Na, V, Cd, Pb, Cr: por espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES). Significativo a 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ); significativo a 5% de probabilidade ( $p < 0,05$ ); significativo a 10% de probabilidade ( $p < 0,10$ ); ns: não significativo.

**Figura 4-1** - Teores dos nutrientes Cu (A), Fe (B), Mo (C), Ni (D), Al (E), Si (F) e Na (G) em sementes de soja em função da aplicação foliar de CoMoNi em R5.2. Londrina-PR, 2023.



#### 4.6 CONCLUSÕES

Os resultados evidenciam que ao utilizar as doses de Co (40 g ha<sup>-1</sup>), Mo (400 g ha<sup>-1</sup>) e Ni (até 100 g ha<sup>-1</sup>) em aplicação única no estágio fenológico R5.2 para enriquecimento de sementes, não houve prejuízo ao crescimento e desenvolvimento da planta-mãe, assim como à produtividade das sementes produzidas. Somado a isso, como ponto mais relevante, destaca-se que houve enriquecimento das sementes com os três elementos, principalmente com níquel, e que não houve efeito negativo sobre os teores de óleo, proteína e ácidos graxos.

## 4.7 REFERÊNCIAS

- ABREU-JUNIOR, C. H.; GRUBERGER, G. A. C.; CARDOSO, P. H. S.; GONÇALVES, P. W. B.; NOGUEIRA, T. A. R.; CAPRA, G. F.; JANI, A. D. Soybean seed enrichment with cobalt and molybdenum as an alternative to conventional seed treatment. **Plants**, v. 12, n. 1164, 14 p., 2023.
- ALSAJRI, F. A.; WIJEWARDANA, C.; IRBY, J. T.; BELLALLOUI, N.; KRUTZ, L. J.; GOLDEN, B.; GAO, W. REDDY, K. R. Developing functional relationships between temperature and soybean yield and seed quality. **Agronomy Journal**, v. 112, p.194-204, 2020.
- ANDRESEN, E.; PEITER, E.; KÜPPER, H. Trace metal metabolism in plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 69, n. 5, p.909-954, 2018.
- 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. 76, p. 1502-1513, 2018.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; PASCOALINO, J. A. L.; SAKO, H.; DE SÁ DANTAS, J. P.; MORAES, M. F. Soybean yield gap in the areas of yield contest in Brazil. **International Journal of Plant Production**, v. 12, p. 159-168, 2018.
- BELLALLOUI, N.; SMITH, J. R.; MENGISTU, A. Seed nutrition and quality, seed coat boron and lignin are influenced by delayed harvest in exotically-derived soybean breeding lines under high heat. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, n. 1563, p. 1-16, 2017.
- BENDER, R. R.; HAEGELE, J. W.; BELOW, F. E. Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern soybean varieties. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 2, p. 563-573, 2015.
- CAMPO, J. C.; ARAÚJO, R. S.; HUNGRIA, M. Molybdenum-enriched soybean seeds enhance N accumulation, seed yield, and seed protein content in Brazil. **Field Crops Research**, v. 110, p. 219-224, 2009.
- CAPELIN, M. A.; MADELLA, L. A.; PANHO, M. C.; MEIRA, D.; BARRIONUEVO, F.; RODRIGUES, A. P. D. C.; BENIN, G. Physiological quality and seed chemical composition of soybean seeds under different altitude. **Bragantia**, v. 81, 16 p., 2021.
- CORTESE, D.; JUNIOR, C. P.; WALTER, J. B.; CORTESE, D.; OLIVEIRA, S. Enrichment, quality, and productivity of soybean seeds with cobalt and molybdenum applications. **Journal of Seed Science**, v. 41, n. 2, p. 144-150, 2019.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes**. 2. ed. Brasília, DF, 2009. 627 p.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF, 2018. 356 p.

EINHARDT, A. M.; FERREIRA, S.; RODRIGUES, F. A. Biochemical and physiological responses of soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] to nickel toxicity. **Bragantia**, v. 80, e1721, 2021.

FERREIRA, S.; PICANÇO, B. B. M.; FONTES, B. A.; EINHARDI, M.; RODRIGUES, F. A. Nickel-enriched soybean seeds generate plants more resistant to Asian soybean rust. **Bragantia**, v. 80, e2421, 2020.

FONTES, B. A.; RODRIGUES, F. C. T.; PICANÇO, B. B. M.; SILVA, L. C. S.; SILVA, B. N.; EINHARDT, A. M.; RODRIGUES, F. A. Nickel potentiates soybean resistance against *Sclerotinia sclerotiorum*. **Tropical Plant Pathology**, v. 49, p. 193-208, 2024.

GHORI, N. H.; GHORI, T.; HAYAT, M. Q.; IMADI, S. R.; GUL, A.; ALTAY, V.; OZTURK, M. Heavy metal stress and responses in plants. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 16, p. 1807-1828, 2019.

GONZÁLES-GUERRERO, M.; MATTHIADIS, A.; SÁEZ, A.; LONG, T. A. Fixating on metals: new insights into the role of metals in nodulation and symbiotic nitrogen fixation. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, n. 45, 10 p., 2014.

HEIL, C. Rapid, multi-component analysis of soybeans by FT-NIR Spectroscopy. **Madison: Thermo Fisher Scientific**, 2010. 3 p. (Application note: 51954). Disponível em: <https://nicoletcz.cz/userfiles/file/vjecy/soybeans.pdf>. Acesso em: 08/07/2024.

HU, X.; WEI, X.; LING, J.; CHEN, J. Cobalt: an essential micronutrient for plant growth? **Frontiers in Plant Science**, v.12, p. 1-24, 2021.

KIRKBY, E. Introduction, definition and classification of nutrients. *In*: MARSCHNER, P. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3. ed. London: Academic Press, 2012, p. 3-5.

MARCOS FILHO, J. Seed vigor testing: an overview of the past, present and future perspective. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 4, p. 363-374, 2015.

MERRY, R.; DOBBELS, A. A.; SADOK, W.; NAEVE, S.; STUPAR, R. M.; LORENZ, A. J. Iron deficiency in soybean. **Crop Science**, v. 62, p. 36-52, 2022.

PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V. Calagem e adubação para as principais espécies oleaginosas e de feijão cultivadas no estado do Paraná. *In*: PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. 1. ed. Curitiba: Núcleo Estadual Paraná da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – NEPAR-SBCS, 2017. p. 215-219.

PAREEK, S.; SAGAR, N. A.; SHARMA, S.; KUMAR, V.; AGARWAL, T.; GONZALEZ-AGUILAR, G. A.; YAHIA, E. M. Chlorophylls: chemistry and biological functions. *In*: YAHIA, M. E. **Fruit and Vegetable Phytochemicals**. 2. ed. Nova Jersey: John Wiley & Sons. 2017. p. 269-284.

PRASAD, R.; SHIVAY, Y. S. Nickel in environment and plant nutrition: a mini review. **International Journal of Plant and Environment**, v. 5, n. 4, p. 239-242, 2019.

RANA, M. S.; BHATANA, P.; IMRAN, M.; SALEEM, M. H.; MOUSSA, M. G.; KHAN, Z.; KHAN, I.; ALAM, M.; ABBAS, M.; BINYAMIN, R.; AFZAL, J.; SYAIFUDIN, M.; DIN, I. U.; YOUNAS, M.; AHMAD, SHAH, M. A.; HU, C. Molybdenum potential vital role in plants metabolism for optimizing the growth and development. **Annals of Environmental Science and Toxicology**, v. 4, n. 1 p. 32-44, 2020.

RIETRA, R. P. J. J.; HEINEN, M.; DIMKPA, C. O.; BINDRABAN, P. S. Effects of nutrient antagonism and synergism on yield and fertilizer use efficiency. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 48, n. 16, p. 1895-1920, 2017.

RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; THOMPSON, H. E.; BENSON, G. O. **How a soybean plant develops**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1977. 20 p. (Special Report, 53).

RODAK, B. W.; FREITAS, D. S.; ROSSI, L. M.; LINHARES, F. S.; MORO, E.; CAMPOS, C. N. S.; REIS, A. R.; GUILHERME, L. R. G.; LAVRES, J. A study on nickel application methods for optimizing soybean growth. **Scientific Reports**, v. 14:10556, 2024.

SFREDO, G. J.; OLIVEIRA, M. C. N. **Soja: molibdênio e cobalto**. Londrina: Embrapa Soja, 2010. (Documentos 322).

SHIMIZU, G. D.; MARUBAYASHI, R. Y. P.; GONÇALVES, L. S. A. **AgroR**: Experimental Statistics and Graphics for Agricultural Sciences. R package version 1.3.6. 2024. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/AgroR/index.html>

SILVA, M. L. S.; TREVIZAM, A. R. **Interações iônicas e seus efeitos na nutrição das plantas**. Piracicaba, SP: International Plant Nutrition Institute, 2015. 7 p. (Informações Agronômicas. n° 149).

VATANSEVER, R.; OZYIGIT, I. I.; FILIZ, E. Essential and beneficial trace elements in plants, and their transport in roots: a review. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 181, n. 1, p. 464-482, 2017.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A prática de enriquecimento de sementes de soja foi abordada nos dois artigos desta pesquisa, buscando-se mostrar os pontos positivos e negativos que possam vir a ocorrer se adotada visando produzir sementes com melhor qualidade fisiológica e melhor capacidade de realizar FBN. Ressalta-se, que referente ao enriquecimento somente com Mo, já são acumulados alguns resultados na literatura, porém, por outro lado, baseado na revisão de literatura realizada, este trabalho se mostra como pioneiro em enriquecer sementes de soja com Co, Mo e Ni de forma conjunta por meio de aplicação foliar única durante a maturação visando à produção de sementes.

Neste sentido, sabendo da importância de cada nutriente para o ideal funcionamento das plantas e também, pensando no equilíbrio nutricional em função do enriquecimento, é importante que esta linha de pesquisa seja continuada a fim que de que mais dados possam ser levantados. Esta continuidade se faz necessária tanto a fim de se avaliar a resposta da planta-mãe em condições de campo, visto que não pode haver redução de produtividade, o que seria um empecilho à adoção pelo produtor de sementes, como também da qualidade fisiológica destas sementes e o desempenho produtivo em campo das plantas oriundas destas sementes enriquecidas com os três nutrientes.

Como abordagem adicional à FBN, é interessante que, caso o enriquecimento com os três nutrientes seja viável é pertinente que seja aberta uma linha de pesquisa visando avaliar a sanidade das plantas oriundas destas sementes, visto que os relatos na literatura já apontam que sementes enriquecidas com Ni modificam o metabolismo das plantas e as tornam mais tolerantes às doenças, com destaque para a ferrugem asiática em específico, que é de grande importância na produção de soja no Brasil. Tal fato justificaria ainda mais a adoção desta prática, mostrando-se como estratégia preventiva veiculada já via semente, que viria somar ao manejo integrado de doenças e contribuiria para redução da pressão sobre os demais métodos de controle disponíveis atualmente no mercado.