

JOLINDA MÉRCIA DE SÁ

**PRODUÇÃO DE SEMENTES DE ALFACE E ACÚMULO DE NUTRIENTES SOB
FONTES E DOSES DE FÓSFORO NO MANEJO ORGÂNICO E CONVENCIONAL**

**Botucatu
2025**

JOLINDA MÉRCIA DE SÁ

**PRODUÇÃO DE SEMENTES DE ALFACE E ACÚMULO DE NUTRIENTES SOB
FONTES E DOSES DE FÓSFORO NO MANEJO ORGÂNICO E CONVENCIONAL**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutora em Agronomia (Horticultura).

Orientador: Antonio Ismael Inácio Cardoso

Botucatu

2025

S111p

Sá, Jolinda Mércia de

Produção de sementes de alface e acúmulo de nutrientes sob fontes e doses de fósforo no manejo orgânico e convencional / Jolinda Mércia de Sá. -- Botucatu, 2026
131 f. : il., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu
Orientador: Antonio Ismael Inacio Cardoso

1. Adubação fosfatada. 2. Produção de sementes. 3. Lettuce seed. 4. Agricultura orgânica. 5. Fósforo. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título:

PRODUÇÃO DE SEMENTES DE ALFACE E ACÚMULO DE NUTRIENTES SOB FONTES E DOSES DE FÓSFORO NO MANEJO ORGÂNICO E CONVENCIONAL

AUTORA: JOLINDA MÉRCIA DE SÁ

ORIENTADOR: ANTONIO ISMAEL INÁCIO CARDOSO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Agronomia (Horticultura), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ANTONIO ISMAEL INÁCIO CARDOSO (Participação Presencial)
Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu

Antonio Ismael Inácio Cardoso

Prof.ª Dr.ª PÂMELA GOMES NAKADA FREITAS (Participação Virtual)
Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas - Unesp Dracena

Pâmela Gomes Nakada Freitas

Prof.ª Dr.ª EMANUELE POSSAS DE SOUZA (Participação Virtual)
Ensino Médio e Técnico / Escola Técnica Estadual Engenheiro Herval Bellusci

Emanuele Possas de Souza

Pós-doutoranda THATIANE NEPOMUCENO ALVES (Participação Presencial)
Horticultura / Faculdade de Ciências Agrônômicas - Unesp Botucatu

Thatiane Nepomuceno Alves

Prof.ª Dr.ª RAÍRA ANDRADE PELVINE (Participação Virtual)
Agronomia / Universidade José do Rosário Vellano - UNIFENAS

Raíra Andrade Pelvine

Botucatu, 02 de dezembro de 2025.

Aos meus amados pais, Josefa e Mário, que me ensinaram o valor do esforço e da honestidade; aos meus irmãos, Jéssica e João Paulo, pelo apoio constante; e ao meu companheiro de vida, Victor, pela paciência e companheirismo em todos os momentos,

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por conceder-me sabedoria e força nos momentos de dificuldade, por sustentar minha caminhada e dar sentido aos meus sonhos.

Ao Prof. Dr. Antonio Ismael Inacio Cardoso pela orientação, ensinamentos, paciência e exemplo de professor e ser humano.

A todos os professores e funcionários da FCA.

A CAPES- Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa de estudos concedida.

Aos amigos e amigas, que caminharam comigo e foram essenciais para a realização desta pesquisa — Jorgi, Manu, Joseantonio, Sara e Camile —, o apoio e a presença de vocês tornaram esta jornada muito mais leve.

Aos membros da banca examinadora – Dra. Pâmela Nakada- Freitas, Dra.

Emanuele de Souza, Dra. Raira Pelvine e Dra. Tathiane Alves- agradeço pela valiosa contribuição ao aprimoramento deste trabalho e pelo tempo dedicado à leitura e às correções.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil – CAPES – Código de financiamento 001.

Se não houver frutos,
Valeu a beleza das flores,
Se não houver flores,
Valeu a sombra das folhas,
Se não houver folhas,
Valeu a intensão da semente.

Henfil

RESUMO

O entendimento do crescimento e do acúmulo de nutrientes pelas plantas é crucial para o manejo eficaz da adubação. No entanto, há uma grande falta de pesquisas nessa área voltadas para a produção de sementes da maioria das hortaliças, especialmente em sistemas de produção orgânica. O objetivo desse estudo foi avaliar a produção, qualidade e absorção de nutrientes em plantas de alface para produção de sementes, em função de doses e fontes de fósforo, sendo uma delas permitida no cultivo orgânico. O experimento foi realizado na Fazenda Experimental da Universidade Estadual Paulista (UNESP), em São Manuel, SP, sob condições de ambiente protegido. Foram avaliados quatro tratamentos (discutidos como experimentos independentes para a absorção de nutrientes) resultantes da combinação entre duas doses de fósforo no plantio (320 e 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e duas fontes de fósforo (orgânica – Termofosfato) - e inorgânica - superfosfato triplo). As plantas de alface crespa, cultivar Solaris, foram coletadas em oito momentos (0, 14, 28, 42, 56, 70, 84 e 98 dias após o transplante - DAT), sendo avaliados tanto o crescimento das plantas quanto o acúmulo de nutrientes em folhas, caule, partes reprodutivas e sementes, esta última apenas aos 98 DAT. Na última avaliação, também foram avaliadas a produção (g planta⁻¹) e qualidade fisiológica das sementes, através da análise de massa de mil sementes, teste de germinação e vigor (índice de velocidade de germinação (IVG) e emergência (IVE)). Os resultados demonstraram crescimento contínuo das plantas, acompanhado por um aumento gradual da matéria seca ao longo do período experimental, independente da dose de fósforo estudada. Para a fonte orgânica de fósforo, a ordem decrescente de acúmulo de nutrientes na parte vegetativa, nas doses de 800 e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅ foi K>Ca>N>Mg>P>S e K>N>Ca>Mg>P>S, respectivamente. Na semente, a ordem decrescente de nutrientes acumulados foi N>K>P>Ca>Mg>S. O fósforo foi acumulado em maior quantidade na semente, 39% e 42% do total de fósforo acumulado pela planta aos 98 DAT, na dose de 800 kg ha⁻¹ e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente. Para o superfosfato triplo, nas doses de 800 e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅, a ordem decrescente de acúmulo de nutrientes na parte vegetativa foi K>Ca>N>P>Mg>S e para as sementes, a ordem decrescente foi N>K>P>Ca>Mg>S. Observou-se que o fósforo acumulado nas sementes representou em média 32,5% do total acumulado pela planta aos 98 DAT. Independente das fontes de fósforo estudadas (termofosfato ou superfosfato triplo), a

maior produção de sementes foi obtida com a maior dose estudada (14,2 g planta⁻¹), mas estas doses não afetaram a qualidade fisiológica das sementes, assim como as fontes utilizadas.

Palavras-chave: *Lactuca sativa* L.; manejo orgânico; qualidade de sementes; termofosfato.

ABSTRACT

Understanding plant growth and nutrient accumulation is crucial for effective fertilization management. However, there is a significant lack of research in this area focused on seed production of most vegetables, especially under organic production systems. The objective of this study was to evaluate seed yield, quality, and nutrient uptake in lettuce plants for seed production, as affected by phosphorus rates and sources, one of which is permitted in organic cultivation. The experiment was conducted at the Experimental Farm of São Paulo State University (UNESP), in São Manuel, SP, under protected environment conditions. Four treatments were evaluated (discussed as independent experiments for nutrient uptake), resulting from the combination of two phosphorus rates at planting (320 and 800 kg ha⁻¹ of P₂O₅) and two phosphorus sources (organic – thermophosphate – and inorganic – triple superphosphate). Lettuce plants (crisphead type, cultivar Solaris) were sampled at eight growth stages (0, 14, 28, 42, 56, 70, 84, and 98 days after transplanting – DAT). Plant growth and nutrient accumulation in leaves, stems, reproductive parts, and seeds (the latter only at 98 DAT) were evaluated. At the final sampling, seed yield (g plant⁻¹) and physiological quality were also assessed through measurements of thousand-seed weight, germination, and vigor (germination speed index – GSI, and emergence speed index – ESI). Results showed continuous plant growth, accompanied by a gradual increase in dry matter over the experimental period, regardless of phosphorus rate. For the organic phosphorus source, the decreasing order of nutrient accumulation in the vegetative part at 800 and 320 kg ha⁻¹ of P₂O₅ was K>Ca>N>Mg>P>S and K>N>Ca>Mg>P>S, respectively. In the seeds, the decreasing order of accumulated nutrients was N>K>P>Ca>Mg>S. Phosphorus was accumulated in greater amounts in the seeds, representing 39% and 42% of the total phosphorus accumulated by the plant at 98 DAT, at 800 and 320 kg ha⁻¹ of P₂O₅, respectively. For triple superphosphate, at 800 and 320 kg ha⁻¹ of P₂O₅, the decreasing order of nutrient accumulation in the vegetative part was K>Ca>N>P>Mg>S, and in the seeds it was N>K>P>Ca>Mg>S. The phosphorus accumulated in the seeds represented, on average, 32.5% of the total accumulated by the plant at 98 DAT. Regardless of the phosphorus source (thermophosphate or triple superphosphate), the highest seed yield was obtained with the highest phosphorus rate (14.2 g plant⁻¹), but neither the rate nor the source affected seed physiological quality.

Keywords: *Lactuca sativa* L.; organic management; seed quality; thermophosphate.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 2- CURVA DE CRESCIMENTO E ACÚMULO DE NUTRIENTES EM ALFACE PARA PRODUÇÃO DE SEMENTES EM SISTEMA ORGÂNICO

- Figure 1. Plant height, number of leaves per plant, and stem diameter of lettuce plants under organic fertilization management with doses of 800 kg ha⁻¹ of P₂O₅ (A,C,E) and 320 kg ha⁻¹ of P₂O₅ (B,D,F). (Caption: ** and *, p<0.01 and p<0.05 of probability, respectively)..... 52
- Figure 2. Dry matter accumulation in leaves, stem, reproductive organs, and total of lettuce plants under organic fertilization management and phosphorus doses of 800 (A) and 320 (B) kg ha⁻¹ of P₂O₅. (Caption: ** and *, p<0.01 and p<0.05 of probability, respectively)..... 53
- Figure 3. Nitrogen accumulation in different parts of lettuce plants grown for seed production under organic fertilization with 800 (A) and 320 (B) kg ha⁻¹ of P₂O₅. (Caption: ** and *, p<0.01 and p<0.05 of probability, respectively). 55
- Figure 4. Phosphorus accumulation in different parts of lettuce plants grown for seed production under organic fertilization with 800 (A) and 320 (B) kg ha⁻¹ of P₂O₅. (Caption: ** and *, p<0.01 and p<0.05 of probability, respectively). 56
- Figure 5. Potassium accumulation in different parts of lettuce plants grown for seed production under organic fertilization with 800 (A) and 320 (B) kg ha⁻¹ of P₂O₅. (Caption: ** and *, p<0.01 and p<0.05 of probability, respectively). 57
- Figure 6. Calcium accumulation in different parts of lettuce plants grown for seed production under organic fertilization with 800 (A) and 320 (B) kg ha⁻¹ of P₂O₅. (Caption: ** and *, p<0.01 and p<0.05 of probability, respectively). 58
- Figure 7. Magnesium accumulation in different parts of lettuce plants grown for seed production under organic fertilization with 800 (A) and 320 (B) kg ha⁻¹ of P₂O₅. (Caption: ** and *, p<0.01 and p<0.05 of probability, respectively). 59
- Figure 8. Sulfur accumulation in different parts of lettuce plants grown for seed production under organic fertilization with 800 (A) and 320 (B) kg ha⁻¹ of P₂O₅. (Caption: ** and *, p<0.01 and p<0.05 of probability, respectively). 61

Figure 9. The daily accumulation rate of the macronutrients in the whole plant (A), the stem (B), the leaves (C), and the reproductive structure (D) of the lettuce plants fertilized with 800 kg ha ⁻¹ of P ₂ O ₅ , according to the days after the transplanting.....	62
Figure 10. Daily accumulation rate of macronutrients in whole plant (A), leaves (B), stem (C), and reproductive part (D) of lettuce plants fertilized with 320 kg ha ⁻¹ of P ₂ O ₅ , according to the days after the transplanting.	63

CAPÍTULO 3- ACÚMULO DE MATÉRIA SECA E DE MACRONUTRIENTES EM ALFACE PARA A PRODUÇÃO DE SEMENTES EM FUNÇÃO DE DOSES DE FÓSFORO

Figura 1. Dados climatológicos da Fazenda Experimental de São Manuel no período de condução do experimento. 2023- 2024	74
Figura 2- Altura de plantas de alface para a produção de sementes nas doses de 800 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅ (A) e 320 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅ (B)	79
Figura 3- Número de folhas por planta de alface para a produção de sementes nas doses de 800 (A) e 320 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅ (B).....	80
Figura 4- Diâmetro de caule de plantas de alface para a produção de sementes nas doses de 800 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅ (A) e 320 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅ (B).....	81
Figura 5- Acúmulo de matéria seca nas folhas, caule, parte reprodutiva e total de plantas de alface nas doses de 800 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅ (A) e 320 ha ⁻¹ de P ₂ O ₅ (B).....	82
Figura 6- Acúmulo de nitrogênio nas diferentes partes das plantas de alface destinadas à produção de sementes nas doses de 800 (A) e 320 (B) kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅	83
Figura 7- Acúmulo de fósforo nas diferentes partes das plantas de alface destinadas à produção de sementes nas doses de 800 (A) e 320 (B) kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅	85
Figura 8- Acúmulo de potássio nas diferentes partes das plantas de alface destinadas à produção de sementes nas doses de 800 (A) e 320 (B) kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅	87
Figura 9. Acúmulo de cálcio nas diferentes partes das plantas de alface destinadas à produção de sementes nas doses de 800 (A) e 320 (B) kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅	88
Figura 10- Acúmulo de magnésio nas diferentes partes das plantas de alface destinadas à produção de sementes nas doses de 800 (A) e 320 (B) kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅	90

Figura 11- Acúmulo de enxofre nas diferentes partes das plantas de alface destinadas à produção de sementes nas doses de 800 (A) e 320 (B) kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅	91
Figura 12- Taxa de acúmulo diário de macronutrientes pela parte aérea total (A), folhas (B), caule (C) e parte reprodutiva (D) das plantas de alface em função dos dias após a semeadura, na dose de 800 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅	94
Figura 13- Taxa de acúmulo diário de macronutrientes pela planta de alface total (A), folha (B), caule (C) e parte reprodutiva (D), em função dos dias após a semeadura, na dose de 320 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅	96

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 - PRODUÇÃO, QUALIDADE E TEOR DE NUTRIENTES EM SEMENTES DE ALFACE EM FUNÇÃO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA ORGÂNICA E CONVENCIONAL

Tabela 1- Análise do solo antes e após a condução da pesquisa.....	31
Tabela 2- Resultados da análise química dos adubos orgânicos termofosfato (T), torta de mamona (TM) e esterco de galinha (EG).....	32
Tabela 3- Quantidade de macronutrientes potencialmente fornecidos por ha antes do plantio, em cobertura e total nos tratamentos com adubos orgânicos e inorgânicos.....	34
Tabela 4- Valores de F para a produção de sementes, massa de mil sementes, número de sementes por planta, primeira contagem (PCG), germinação (G), índice de velocidade de germinação (IVG), emergência (E) e índice de velocidade de emergência (IVE) de sementes de alface em função do manejo da adubação orgânico e convencional e doses de fósforo	36
Tabela 5- Valores médios da produção de sementes por planta, massa de mil de sementes, número de sementes por planta, primeira contagem (PCG), germinação (G), índice de velocidade de germinação (IVG), emergência (E) e índice de velocidade de emergência (IVE) de sementes alface em função de fontes e doses de fósforo.....	37
Tabela 6- Teor de nutrientes em sementes de alface em função de fontes e doses de fósforo	40

CAPÍTULO 2 - CURVA DE CRESCIMENTO E ACÚMULO DE NUTRIENTES EM ALFACE PARA PRODUÇÃO DE SEMENTES EM SISTEMA ORGÂNICO

Table 1. The soil analysis before and after the experiment.	48
Table 2. The results of the chemical analysis of the fertilizers: Yoorin® thermophosphate (YT), castor bean cake (CBC), and chicken manure (CM).....	49

Table 3. The amount of macronutrients potentially supplied per hectare before planting, during topdressing, and in total for the treatments with organic fertilizers. .49

CAPÍTULO 3- ACÚMULO DE MATÉRIA SECA E DE MACRONUTRIENTES EM ALFACE PARA A PRODUÇÃO DE SEMENTES EM FUNÇÃO DE DOSES DE FÓSFORO

Tabela 1- Análise do solo antes e após a condução da pesquisa	75
Tabela 2- Quantidade de macronutrientes potencialmente fornecidos por ha antes do plantio, em cobertura e total nos tratamentos	76

CAPÍTULO 4- DOSES E FONTES DE FÓSFORO NO ACÚMULO DE MACRONUTRIENTES EM PLANTAS DE ALFACE DESTINADAS À PRODUÇÃO DE SEMENTES

Tabela 1- Análise do solo antes e após a condução da pesquisa	105
Tabela 2- Resultados da análise química dos adubos orgânicos termofosfato (T), torta de mamona (TM) e esterco de galinha (EG)	106
Tabela 3- Quantidade de macronutrientes potencialmente fornecidos por ha antes do plantio, em cobertura e total nos tratamentos com adubos orgânicos e inorgânicos	107
Tabela 4- Valores médios e percentuais (em relação a massa seca total) da massa seca das folhas (MSF), caule (MSC), parte vegetativa (MSPV) e sementes (MSS), em resposta as doses de fósforo e dois tipos de manejo (orgânico e convencional) aos 98 dias após o transplante.....	111
Tabela 5- Valores médios da massa seca total da planta (MST), da parte reprodutiva com as sementes (MST-PR) e percentuais em relação a massa seca total (%) em resposta as doses de fósforo e dois tipos de manejo (orgânico e convencional) aos 98 dias após o transplante.....	111
Tabela 6- Valor médio de nitrogênio acumulado nas sementes de alface sob manejo orgânico e convencional da adubação fosfatada com dose de 800 e 320 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅ aos 98 dias após o transplante e percentual em relação ao acúmulo total de nitrogênio na planta	112

Tabela 7- Valores médios para o acúmulo de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) nas sementes de alface em função de doses (800 e 320 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅) e fontes de fósforo (orgânico e convencional) e percentual em relação ao acúmulo total do nutriente na planta	113
Tabela 8- Valores médios para o acúmulo de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre na parte vegetativa (caule + folhas) e percentual em relação ao acúmulo total na planta, de plantas de alface em função de doses (800 e 320 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅) e fontes de fósforo (orgânica e convencional)	116
Tabela 9- Valores médios para o acúmulo de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre na parte reprodutiva (outras + sementes), e percentual em relação ao acúmulo total na planta, de plantas de alface em função de doses (800 e 320 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅) e fontes de fósforo (orgânica e convencional).....	119
Tabela 10- Valores médios para o acúmulo total de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre em plantas de alface (vegetativo + reprodutivo), e percentual em relação ao acúmulo total na planta, em função de doses (800 e 320 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅) e fontes de fósforo (orgânica e convencional).....	122

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	25
CAPÍTULO 1- PRODUÇÃO, QUALIDADE E TEOR DE NUTRIENTES EM SEMENTES DE ALFACE EM FUNÇÃO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA ORGÂNICA E CONVENCIONAL	27
1.1 INTRODUÇÃO.....	28
1.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	30
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
1.4 CONCLUSÕES.....	41
REFERÊNCIAS.....	42
CAPÍTULO 2- CURVA DE CRESCIMENTO E ACÚMULO DE NUTRIENTES EM ALFACE PARA PRODUÇÃO DE SEMENTES EM SISTEMA ORGÂNICO	45
2.1. INTRODUCTION.....	46
2.2 MATERIALS AND METHODS.....	47
2.2.1 EXPERIMENTAL SITE AND TREATMENTS.....	47
2.2.3 EVALUATED CHARACTERISTICS.....	49
2.2.4 STATISTICAL ANALYSIS.....	50
2.3 RESULTS.....	50
2.3.1 AGRONOMIC CHARACTERISTICS.....	50
2.3.2 DRY MATTER ACCUMULATION.....	53
2.3.3 MACRONUTRIENTS ACCUMULATION.....	54
2.3.4 DAILY ACCUMULATION RATE.....	61
2.4 DISCUSSION.....	64
2.5 CONCLUSIONS.....	68
REFERENCES.....	69

CAPÍTULO 3- ACÚMULO DE MATÉRIA SECA E DE MACRONUTRIENTES EM ALFACE PARA A PRODUÇÃO DE SEMENTES EM FUNÇÃO DE DOSES DE FÓSFORO	71
3.1 INTRODUÇÃO	72
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	73
3.2.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS	74
3.2.2 CARACTERÍSTICAS AVALIADAS.....	76
3.3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	77
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
3.3.1 ALTURA DE PLANTAS.....	78
3.3. 2 NÚMERO DE FOLHAS	79
3.3.3 DIÂMETRO DE CAULE.....	80
3.3.4 ACÚMULO DE MATÉRIA SECA.....	81
3.3.5 ACÚMULO DE MACRONUTRIENTES.....	82
3.3.6 TAXA DE ACÚMULO DIÁRIO.....	92
3.4 CONCLUSÕES	97
REFERÊNCIAS	98
CAPÍTULO 4- DOSES E FONTES DE FÓSFORO NO ACÚMULO DE MACRONUTRIENTES EM PLANTAS DE ALFACE DESTINADAS À PRODUÇÃO DE SEMENTES	101
4.1 INTRODUÇÃO	103
4.2 MATERIAL E MÉTODOS	104
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	109
4.4 CONCLUSÕES	123
REFERÊNCIAS.....	124
CONSIDERAÇÕES FINAIS	127
REFERÊNCIAS	130

INTRODUÇÃO GERAL

Entre as hortaliças mais consumidas no Brasil, a alface (*Lactuca sativa* L.) se destaca dentro do grupo das folhosas por possuir baixo teor calórico, sendo uma fonte rica de fibras, ferro, folato, vitamina C e compostos bioativos, por isso é uma opção nutritiva e acessível (Kim *et al.*, 2016). Suas folhas variam em coloração, apresentando diferentes tonalidades de verde e algumas com partes arroxeadas (Maldonade *et al.*, 2014). Entre os tipos de alface, destacam-se as variedades lisa, crespa, americana e romana (Costa; Sala, 2012; Demartelaere *et al.*, 2020).

A alficultura movimenta no país, em média, um montante de R\$ 8 bilhões apenas no varejo, com uma produção de mais de 1,5 milhão de toneladas ao ano (ABCSEM, 2015). De acordo com dados do censo agropecuário do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2017), o Brasil possui um total de 108.382 estabelecimentos com produção de alface. O Estado de São Paulo é o maior produtor e consumidor no País (cerca de 137 mil toneladas em 8 mil hectares plantados), seguido do Paraná (54 mil toneladas em 2.845 ha) e Minas Gerais (18 mil toneladas em 1.192 ha) (Pessoa *et al.*, 2021).

A olericultura desempenha um papel essencial na agricultura brasileira proporcionando benefícios socioeconômicos significativos, e tem avançado notavelmente na busca por alimentos de alta qualidade e segurança nutricional (Rodrigues, 2019). Nesse contexto, a produção de hortaliças orgânicas tem ganhado destaque, promovendo o consumo de alimentos saudáveis e livres de resíduos de defensivos agrícolas. Estima-se que nos últimos anos o setor de orgânicos tem crescido significativamente no Brasil, com mais de 24.000 agricultores registrados no Cadastro Nacional de Produtores Orgânicos (MAPA, 2023).

Mesmo com esse crescimento, a “olericultura orgânica” enfrenta alguns problemas, sendo um dos principais a escassa oferta de sementes produzidas no sistema orgânico para atender ao processo de certificação em toda a cadeia produtiva, condicionando os produtores ao uso de sementes convencionais, por serem mais acessíveis e de qualidade comprovada (Nascimento *et al.*, 2012).

Apesar das inúmeras pesquisas na área de nutrição de hortaliças, os estudos sobre a produção de sementes, notadamente no sistema orgânico, ainda são escassos, limitando o potencial de produção das culturas nesse sistema. Assim,

compreender a dinâmica de absorção e acúmulo de nutrientes é importante para a elaboração de programas de adubação, buscando a sustentabilidade e a eficiência produtiva dos cultivos, bem como a economia de recursos naturais.

Uma maneira prática de avaliar a eficiência produtiva no incremento de biomassa é por meio de curvas de crescimento, que utilizam modelos de regressão não-linear para descrever o avanço do crescimento em função da idade da planta. Esses modelos matemáticos permitem estimar a biomassa acumulada em diferentes estágios e fornecem parâmetros que auxiliam na interpretação dos fenômenos biológicos envolvidos, facilitando o entendimento de como o acúmulo de nutrientes influencia o crescimento ao longo do ciclo (Cao *et al.*, 2019; Silva, 2010). Dessa forma, as curvas de crescimento são ferramentas fundamentais para ajustar o manejo nutricional de forma precisa, maximizando a produção e a qualidade das sementes.

A adubação fosfatada, em particular, desempenha um papel crucial na produção de sementes de alface (Kano *et al.*, 2012a). A fácil redistribuição de fósforo na planta permite que parte da exigência para o crescimento e produção seja satisfeita pela mobilização de suas reservas (Malavolta, 2006).

Quadros *et al.* (2010) estudaram o acúmulo de nutrientes em sementes de alface em função de doses de composto orgânico com e sem adição de fósforo ao solo, e observaram que a maior produção de sementes e o maior acúmulo de todos os macronutrientes foi nos tratamentos com aplicação de fósforo no solo. A aplicação adequada de fertilizantes fosfatados pode melhorar a eficiência do uso de fósforo pela planta, garantindo um desenvolvimento inicial de plântulas, aumentando a produtividade e a qualidade das sementes.

Para maximizar a produção de sementes de alface, é necessário um entendimento detalhado das interações entre a curva de acúmulo de nutrientes na planta, a adubação fosfatada e as práticas de manejo. Isso inclui a quantidade de nutrientes aplicada, o momento e a forma de aplicação. Diante disso, objetivou-se com essa pesquisa estudar a produção e qualidade de sementes e determinar a curva de acúmulo de matéria seca e de macronutrientes nessa espécie visando a produção de sementes, em função de doses de fósforo a partir de fontes permitidas no sistema orgânico e no manejo convencional.

CAPÍTULO 1

PRODUÇÃO, QUALIDADE E TEOR DE NUTRIENTES EM SEMENTES DE ALFACE EM FUNÇÃO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA ORGÂNICA E CONVENCIONAL

RESUMO

A nutrição de plantas de alface voltada para a produção de sementes requer um manejo adequado dos nutrientes ao longo de todo o ciclo, dada a alta demanda nutricional especialmente na fase reprodutiva. A escassez de informações sobre o impacto da adubação na produção e qualidade de sementes de hortaliças, destaca a necessidade de definir a demanda nutricional e as doses ideais de nutrientes para otimizar a produção e qualidade das sementes. Diante do exposto, objetivou-se estudar o efeito de doses e fontes de fósforo aplicadas antes do plantio na produção, qualidade e teor de nutrientes de sementes de alface sob manejo orgânico e convencional. O experimento foi conduzido em ambiente protegido na Fazenda Experimental de São Manuel, localizada no município de São Manuel, SP, pertencente a UNESP/FCA, campus de Botucatu, SP. Foram estudados quatro tratamentos, em um fatorial 2 x 2, com duas doses de fósforo no plantio (320 e 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e duas fontes de fósforo (termofosfato e superfosfato triplo), com cinco repetições. Aos 98 DAT foram colhidas as sementes e avaliadas a produção por planta, a massa de mil sementes e a qualidade fisiológica das sementes (germinação, índice de velocidade de germinação, emergência e índice de velocidade de emergência das plântulas). As fontes e doses utilizadas não afetaram nem a produção e a qualidade fisiológica das sementes e, independente da fonte, a maior produção de sementes foi obtida com a maior dose de fósforo (14,2 g planta⁻¹, cerca de 28% a mais que a menor dose). As fontes de fósforo não diferiram quanto ao teor dos nutrientes nas sementes, mas o teor de nitrogênio foi maior na dose de 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅. O teor de nutrientes nas sementes decresceu na seguinte ordem: N > K > P > Mg > Ca > S.

Palavras-chave: fósforo; germinação; *Lactuca sativa* L.; superfosfato; termofosfato.

ABSTRACT

Lettuce plant nutrition aimed at seed production requires proper nutrient management throughout the entire growth cycle, given the high nutrient demand, especially during the reproductive stage. The scarcity of information regarding the impact of fertilization on vegetable seed production and quality highlights the need to define nutrient requirements and optimal nutrient rates to improve seed yield and quality. Therefore, this study aimed to evaluate the effect of phosphorus rates and sources applied before planting on seed yield, quality, and nutrient content of lettuce grown under organic and conventional management systems. The experiment was conducted in a protected environment at the São Manuel Experimental Farm, located in São Manuel, SP, belonging to UNESP/FCA, Botucatu campus. Four treatments were studied in a 2 × 2 factorial scheme, combining two phosphorus rates at planting (320 and 800 kg ha⁻¹ of P₂O₅) and two phosphorus sources (thermophosphate and triple superphosphate) and five replications. Seeds were harvested 98 days after transplanting and evaluated for seed yield per plant, thousand-seed weight, and physiological quality (germination, germination speed index, seedling emergence, and emergence speed index). The phosphorus sources and rates (thermophosphate or triple superphosphate) did not affect seed yield or physiological quality. Regardless of the source, the highest phosphorus rate resulted in greater seed production (14.2 g plant⁻¹, approximately 28% higher than the lower rate). Phosphorus sources did not differ in terms of nutrient content in the seeds, but nitrogen content was higher at the 800 kg ha⁻¹ P₂O₅ rate. The nutrient content in the seeds decreased in the following order: N > K > P > Mg > Ca > S.

Keywords: phosphorus; germination; *Lactuca sativa* L.; triple superphosphate; thermophosphate.

1.1 INTRODUÇÃO

A adubação fosfatada desempenha um papel crucial na produção de sementes de alface, pois o fósforo (P) é um nutriente essencial para diversas funções metabólicas que impactam diretamente o crescimento e a produção. Embora existam

informações sobre as exigências nutricionais da alface, poucas pesquisas enfocam a produtividade e a qualidade das sementes em relação a doses e fontes de fósforo. Essas informações são cruciais, pois a quantidade de fósforo necessária para a produção de alface para consumo pode diferir da produção de sementes, que apresenta um ciclo mais longo e maior extração de nutrientes (Kano *et al.*, 2012a).

Além da quantidade também a fonte de fósforo pode influenciar a produção de sementes, ainda mais em solos tropicais, pois, além de a maioria deles serem pobres neste nutriente, eles são altamente fixadores desse nutriente. Como o fósforo é um recurso natural e finito, a otimização de sua utilização torna-se necessária para uma agricultura mais sustentável (Cardoso *et al.*, 2019; Tamelini *et al.*, 2024).

As principais fontes de fósforo na adubação são os superfosfatos, simples e triplo. Porém, estes não podem ser utilizados no sistema orgânico. Dentre as opções de adubos fosfatados permitidos no sistema orgânico tem-se o termofosfato, que apresenta como característica a dissolução mais lenta do P em relação às fontes fosfatadas solúveis (Cardoso *et al.*, 2019; Tamelini *et al.*, 2024), podendo ser uma boa opção para a produção de sementes de alface, com liberação ao longo do ciclo.

Na produção de sementes, a escolha da quantidade de fósforo é essencial para garantir a disponibilidade deste nutriente ao longo do ciclo da planta, evitando distúrbios fisiológicos que possam comprometer a produtividade ou qualidade das sementes. Kano *et al.* (2012a) avaliaram doses de fósforo (0 a 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅) na produção e qualidade de sementes de alface e verificaram aumento linear na produção e no número de sementes por planta em função das doses estudadas, mas sem efeito na qualidade das sementes até um ano após a colheita, apenas após 25 meses (Kano *et al.*, 2011). Shahinul *et al.* (2020) estudaram doses de N, P, K e B na produção de sementes de alface e observaram que a maior produtividade (571,5 kg ha⁻¹) foi obtida com a dose de 67,8 kg ha⁻¹ de P₂O₅, ou seja, bem inferior às avaliadas por Kano *et al.* (2012a) que trabalharam com um solo muito pobre em fósforo (2 mg dm⁻³).

A qualidade das sementes de hortaliças é um fator crucial para garantir o sucesso do cultivo, afetando diretamente a germinação, o vigor das plântulas e, conseqüentemente, a produtividade das plantas. Estudos como o de Bezerra (2024) e Carvalho *et al.* (2017) mostram que é possível obter sementes de alta qualidade através de práticas orgânicas, que não apenas preservam o meio ambiente, mas

também promovem a saúde dos consumidores. Porém, estas pesquisas foram feitas apenas no sistema orgânico, enquanto Kano *et al.* (2012a) estudaram apenas uma fonte inorgânica, não tendo sido encontrado trabalho comparando fontes orgânicas e inorgânicas.

Diante do que foi exposto, objetivou-se estudar o efeito de doses e fontes de fósforo aplicado antes do plantio na produção, qualidade e teor de nutrientes de sementes de alface produzidas sob manejo da adubação orgânica e convencional.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida na Fazenda Experimental da Universidade Estadual Paulista, localizada no município de São Manuel, São Paulo (22°46'04.9"S, 48°34'19.4"W e 709 m de altitude), no período de 29 de setembro de 2023 (semeadura) a 05 de fevereiro de 2024 (colheita das sementes). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é tropical do tipo Aw, com verão chuvoso e inverno seco (Franco *et al.*, 2023).

O experimento foi conduzido em ambiente protegido, em estufa do tipo arco, com pé direito de 2,5 m, coberta com filme de polietileno de alta densidade (150 μm) e laterais fechadas com tela antiafídica. As médias da temperatura máxima, média e mínima, umidade relativa (UR) e precipitação média diária para o período foram 30,3°C, 23,7°C, 18,9°C, 69,1% e 4,6 mm, respectivamente (Figura 1). Estes dados referem-se ao ambiente externo ao ambiente protegido. As plantas foram conduzidas em vasos plásticos com 8 L de capacidade.

O solo utilizado foi classificado como latossolo vermelho distrófico típico arenoso (Santos *et al.*, 2018). Antes e após a condução do experimento, amostras de solo foram coletadas e enviadas para o Departamento de Ciência Florestal, Solos e Ambiente da FCA/UNESP, campus de Botucatu-SP, para a análise química. A correção do solo foi realizada com base na análise para elevar a saturação por bases a 80%, seguindo a recomendação de Trani *et al.* (2022). O solo apresentava baixo teor de fósforo (13 mg dm⁻³) antes da instalação da pesquisa, passando para médio (48 e 57 mg dm⁻³) e muito alto (130 e 157 mg dm⁻³) ao final do experimento, com as doses 320 e 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente (Tabela 1).

Figura 1- Dados climatológicos da Fazenda Experimental de São Manuel no período de condução do experimento. 2023-2024

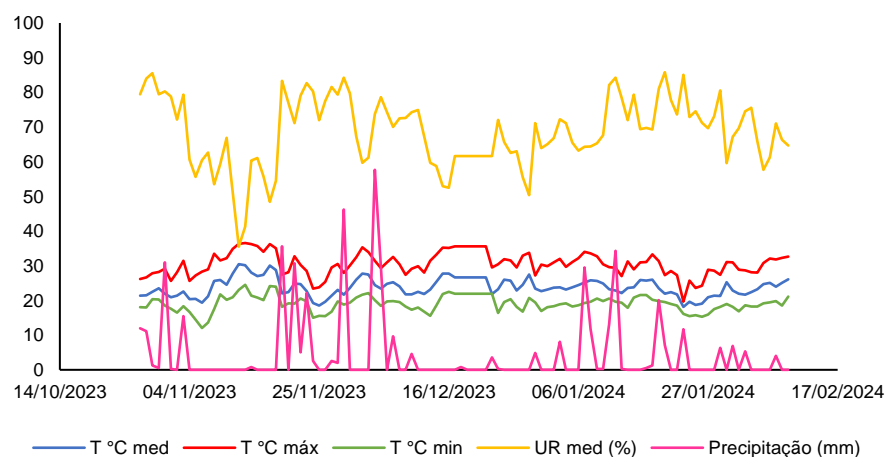


Tabela 1- Análise do solo antes e após a condução da pesquisa

Fonte	pH(CaCl ₂)	M.O.	P _{res}	H+Al	SB	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CTC	V	Cu	Fe	Mn	Zn	B
		g dm ⁻³	mg dm ⁻³			mmol _c dm ⁻³				%					
Antes da calagem	4,6	2	13	18	27	1,1	20	6	45	59	1,0	8	5,6	0,7	0,19
Antes do plantio	5,8	6	13	12	50	1,3	36	12	62	80	-	-	-	-	-
Após a colheita															
Fonte	Dose (kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅)														
**Org.	320	6,5	7	48	11	71	0,7	52	18	82	86	-	-	-	-
	800	6,8	10	157	9	90	2,0	60	28	98	91	-	-	-	-
*Conv.	320	7,0	7,0	57	8	61	1,1	46	14	68	89	-	-	-	-
	800	5,6	6,0	130	16	58	4,4	38	16	74	78	-	-	-	-

*Convencional; **Orgânico.

Foram estudados quatro tratamentos, em um fatorial 2 x 2, com duas doses de fósforo no plantio (320 e 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e duas fontes de fósforo (orgânica - termofosfato - e inorgânica - superfosfato triplo), com cinco repetições e uma planta por parcela. A dose 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅ é a dose recomendada por Trani *et al.* (2022) para o cultivo de alface para o mercado *in natura*, enquanto 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅ é a dose em que Kano *et al.* (2012a) obtiveram a maior produtividade de sementes de alface.

As adubações antes do plantio com nitrogênio e potássio foram feitas com base na análise de solo e de acordo com as recomendações de Trani *et al.* (2022). Na

adubação de plantio e de cobertura foram utilizadas a ureia e a torta de mamona como fonte de N, cloreto de potássio e sulfato de potássio como fonte de K, nos tratamentos inorgânico e orgânico, respectivamente.

A adubação de plantio correspondeu ao fornecimento de 0,16 g de N e 0,48 g de K₂O por vaso, correspondendo a 40 e 120 kg ha⁻¹ de N e de K₂O, respectivamente, além de 80 g por vaso (planta) de esterco de galinha como fonte de matéria orgânica, correspondendo a 20 t ha⁻¹ de esterco de galinha. Na Tabela 2 estão os resultados das análises químicas do termofosfato e dos adubos orgânicos utilizados, que foram feitas conforme o Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos (MAPA, 2017).

Tabela 2- Resultados da análise química dos adubos orgânicos termofosfato (T), torta de mamona (TM) e esterco de galinha (EG)

Fontes	N	P ₂ O ₅ Total	P ₂ O ₅ Ac***	K ₂ O	S	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	Relação C/N
----- % (ao natural) -----				-----mg/kg(ao natural)-----								
T	-	18,0	17	ND**	ND	-	-	-	-	-	-	-
TM	5,38	1,13	-	0,73	0,16	0,84	0,41	33	1501	101	114	8/1
EG	1,15	1,30	-	1,57	0,20	1,14	0,47	150	9790	324	137	-

*Teores totais; **Não detectado; *** solúvel em ácido cítrico.

A adubação fosfatada de plantio, foi aplicado o superfosfato triplo e termofosfato em quantidades suficientes para fornecer 3,2 e 1,28 g por planta de P₂O₅, correspondente as doses de 800 e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente.

As mudas da variedade crespa, cultivar Solaris foram produzidas em bandejas com 200 células contendo substrato Carolina Soil® e foram transplantadas no dia 27 de outubro de 2023 em vasos com capacidade para 8L de solo. Os vasos foram dispostos a uma distância 1,0 m entre linhas e 0,5 m entre plantas.

Na adubação em cobertura, N, P₂O₅ e K₂O foram fornecidos nas quantidades de 0,18, 0,06 e 0,12 g por planta, respectivamente, semanalmente, iniciando-se aos 7 dias após o transplante (DAT), até uma semana anterior a colheita das sementes. No tratamento com adubos inorgânicos foram utilizados ureia, MAP e cloreto de potássio e no orgânico a torta de mamona, o termofosfato e o sulfato de potássio. Na Tabela 3 tem-se a quantidade de macronutrientes potencialmente fornecidos por hectare antes do plantio, em cobertura e total nos tratamentos com adubos orgânicos e inorgânicos considerando-se todos os adubos utilizados ao longo do ciclo. Apesar de terem sido

aplicadas outras fontes de fósforo antes do plantio e em cobertura, resultando em doses totais maiores que 320 e 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅, considerou-se como tratamento as doses aplicadas com as duas fontes principais (termofosfato e superfosfato), visto que o esterco de galinha (260 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e o P aplicado em cobertura (210 kg ha⁻¹ de P₂O₅) as doses foram iguais para todas as parcelas. No caso dos tratamentos com adubos orgânicos ainda teve a torta de mamona que contribuiu com pequena quantidade de fósforo (9 kg ha⁻¹ de P₂O₅).

A irrigação foi feita de forma localizada com uso de fitas gotejadoras, sendo o fornecimento de água parcelado em três aplicações diárias. O controle de plantas espontâneas foi feito de forma manual.

A colheita das sementes foi feita de forma manual mediante corte das hastas florais aos 98 dias após o transplântio (DAT), quando os aquênios apresentavam cerdas (*papus*) brancas na inflorescência. As sementes foram extraídas friccionando-se as inflorescências na superfície de uma peneira. Após a extração, as sementes foram passadas no aparelho separador de sementes por densidade (modelo 'De Leo Tipo 1'), conforme Bezerra *et al.* (2023). As sementes foram armazenadas em câmara seca (40% de umidade relativa e temperatura de 20°C), quando o teor de água se estabilizou em aproximadamente 7%. Para obtenção da produção de sementes beneficiadas, fez-se a pesagem em balança analítica (precisão de 0,01g), com resultados expressos em g planta⁻¹.

Tabela 3- Quantidade de macronutrientes potencialmente fornecidos por ha antes do plantio, em cobertura e total nos tratamentos com adubos orgânicos e inorgânicos

Tratamento	N	K ₂ O	P ₂ O ₅	Ca	Mg	S
kg ha ⁻¹						
Antes do plantio*						
Org320	270	439,4	589,0	234,2	97,3	77,2
Org800	270	439,4	1069,0	234,2	97,3	77,2
Inorg320	270	434,0	580,0	228,0	94,0	40,0
Inorg800	270	434,0	1060,0	316,0	94,0	40,0
Em cobertura						
Org320	630	420	210	60,0	30,0	126,0
Org800	630	420	210	60,0	30,0	126,0
Inorg320	630	420	210	-	-	-
Inorg800	630	420	210	-	-	-
Total						
Org320	900	859,4	799,0	294,2	127,3	203,2
Org800	900	859,4	1279,0	294,2	127,3	203,2
Inorg320	900	854,0	790,0	228,0	94,0	40,0
Inorg800	900	854,0	1270,0	316,0	94,0	40,0

* Considerando-se o esterco de galinha que foi igual para todos.

Org320 = tratamento com adubos orgânicos e aplicação de 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅, antes do plantio.

Org800 = tratamento com adubos orgânicos e aplicação de 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅, antes do plantio.

Inorg320 = tratamento com adubos inorgânicos e aplicação de 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅, antes do plantio.

Inorg800 = tratamento com adubos inorgânicos e aplicação de 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅, antes do plantio.

Para obtenção da massa de mil sementes foram contadas oito amostras de 100 sementes tomadas ao acaso de cada parcela e oito repetições, e posterior determinação da massa, em gramas, em balança analítica de precisão (0,001g), conforme as Regras de Análise de Sementes - RAS (Brasil, 2009). A produção de sementes em número por planta foi estimada a partir dos dados de produção por planta (g) e da massa de mil sementes.

Foi realizado o teste de germinação, com quatro repetições de 50 sementes dispostas em caixa gerbox com duas folhas de papel mata-borrão umedecido com água destilada na quantidade de 2,5 vezes a massa do papel seco. As caixas foram postas em germinador do tipo B.O.D. regulado a uma temperatura constante de 20°C. Foram realizadas contagens diárias de plântulas normais, até os 7 dias após a semeadura (DAS). O total de sementes germinadas aos 4 e 7 DAS, foram considerados a primeira contagem e germinação total, respectivamente. Foram consideradas germinadas as sementes que apresentavam as folhas cotiledonares totalmente expandidas (Brasil, 2009).

O índice de velocidade de germinação (IVG) foi calculado utilizando os dados diários coletados do teste de germinação. A obtenção deste índice foi por meio da equação (1) descrita por Maguire (1962):

$$IVG = G_1/N_1 + G_2/N_2 + \dots + G_n/N_n \quad (1)$$

Onde G_1, G_2, G_n é número de sementes germinadas em cada contagem, N_1, N_2, N_n é número de dias da semeadura a cada contagem.

Também foi feito o teste de emergência em bandeja. As sementes foram semeadas em bandejas de polipropileno de 200 células contendo substrato comercial Carolina Soil®, sendo colocadas duas sementes por célula, e avaliadas quatro repetições de 50 células por tratamento, sendo desbastado para uma plântula aos 7 DAS. Foram feitas avaliações diárias de emergência até 14 DAS, sendo que a emergência total (%) foi considerada quando a emergência se tornou constante. O índice de velocidade de emergência (IVE) foi calculado de acordo com a equação (2) descrita por Maguire (1962):

$$IVE = \frac{E_1}{N_1} + \frac{E_2}{N_2} + \dots + \frac{E_n}{N_n} \quad (2)$$

Onde E_1, E_2, \dots, E_n é número de plântulas emergidas em cada contagem, N_1, N_2, \dots, N_n é o número de dias da semeadura a cada contagem.

Para a determinação dos teores de nutrientes foram coletadas três amostras de sementes, dos quatro tratamentos estudados, sendo postas a secar em estufa de circulação forçada de ar a 65°C, até atingirem massa constante. Após esse processo, as sementes passaram pelo processo de moagem utilizando almofariz e pistilo (Malavolta *et al.*, 1997).

As amostras moídas foram encaminhadas para o laboratório de análise química de plantas da UNESP/FCA para determinação do teor de macronutrientes nas sementes. Foi utilizada a metodologia descrita por Malavolta *et al.* (1997), sendo a digestão sulfúrica para determinação de nitrogênio, e a digestão nítrico-perclórica para os demais macronutrientes.

Os dados foram submetidos a análise de variância e a comparação entre as doses e os tipos de manejo foi feita utilizando o teste F ao nível de 5% de probabilidade, utilizando o Software Sisvar (Ferreira, 2011).

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em relação a produção de sementes e ao número de sementes por planta, houve diferença significativa apenas entre as doses de fósforo (Tabela 4), com a maior dose sendo 39,2% e 24,3% superior a menor dose avaliada, respectivamente (Tabela 5). Os manejos e as doses de fósforo não afetaram a qualidade fisiológica das sementes (germinação e vigor), assim como a massa de mil sementes (Tabela 4).

A maior produção de sementes com a dose de 800 kg ha⁻¹ evidencia a necessidade de maior quantidade de fósforo quando o objetivo é a produção de sementes. Segundo Cardoso *et al.* (2016), a deficiência de fósforo no cultivo de plantas para a produção de sementes geralmente causa atraso na floração e redução no número de sementes e frutos em muitas espécies.

Tabela 4- Valores de F para a produção de sementes, massa de mil sementes, número de sementes por planta, primeira contagem (PCG), germinação (G), índice de velocidade de germinação (IVG), emergência (E) e índice de velocidade de emergência (IVE) de sementes de alface em função do manejo da adubação orgânico e convencional e doses de fósforo

Tratamentos	Produção de sementes	Massa de mil sementes	Número de sementes	PCG (%)	%G	IVG	%E	IVE
Manejo (M)	0,04 ^{ns}	1,44 ^{ns}	0,42 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,09 ^{ns}	1,07 ^{ns}	0,87 ^{ns}	0,53 ^{ns}
Dose (D)	13,51 ^{**}	9,93 ^{ns}	4,85 ^{**}	8,9 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,4 ^{ns}	0,29 ^{ns}	0,03 ^{ns}
M x D	0,03 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,9 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,7 ^{ns}	2,62 ^{ns}	4,60 ^{ns}

ns= não significativo; ** significativo a 1% de probabilidade.

Tabela 5- Valores médios da produção de sementes por planta, massa de mil de sementes, número de sementes por planta, primeira contagem (PCG), germinação (G), índice de velocidade de germinação (IVG), emergência (E) e índice de velocidade de emergência (IVE) de sementes alface em função de fontes e doses de fósforo

Fontes	Produção (g planta ⁻¹)	Massa de mil sementes (g)	Número de sementes (unidade por planta)	PCG (%)	%G	IVG	%E	IVE
Orgânica	11,8 a	0,9 a	13.796 a	98,3 a	100,0 a	66,2 a	95,0 a	71,2 a
Convencional	11,9 a	1,0 a	12.939 a	98,5 a	100,0 a	65,3 a	93,0 a	70,3 a
Doses (kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅)								
800	14,2 a	0,96 a	14.817 a	99,0 a	100,0 a	65,5 a	93,0 a	70,7 a
320	10,2 b	0,88 a	11.917 b	97,0 a	100,0 a	66,0 a	94,0 a	70,9 a

*Médias seguidas por letras diferentes na coluna diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F.

Kano *et al.* (2012a), estudando doses de fósforo na produção e na qualidade de sementes de alface, observaram aumento linear na produção e no número de sementes por planta com o aumento das doses de fósforo de 0 a 800 kg ha⁻¹, mas sem qualquer influência sobre a qualidade das sementes. Quadros *et al.* (2012), avaliando doses de composto orgânico, com e sem a presença de fósforo na produção e na qualidade de sementes de alface, observaram que a qualidade das sementes não foi afetada por ambos os fatores, no entanto afetaram a produção de sementes, com valor de produção superior no manejo com a presença de fósforo. Soffer e Smith (1974) observaram que o aumento da fertilidade do solo elevou o rendimento de sementes de alface, porém não resultou em um aumento proporcional no vigor das sementes.

Muitas vezes o cultivo de plantas para a produção de sementes requer práticas semelhantes às dos cultivos destinados à produção de alimentos, e as recomendações de fertilização usuais são baseadas na demanda por nutrientes essenciais (N, P, K, Ca, Mg, S, além de micronutrientes) para a síntese de biomassa vegetal (Albornoz *et al.*, 2019). Porém, na produção de sementes de muitas espécies olerícolas, principalmente as herbáceas, como a alface, o ciclo é muito maior e a demanda por nutrientes é maior do que nos cultivos comerciais, e, portanto, a quantidade fornecida precisa atender as demandas da planta nas diferentes fases do ciclo, evitando deficiências nutricionais que podem afetar a produção. Neste trabalho

percebe-se claramente que uma adubação realizada que tem como base a recomendação para alface para consumo *in natura*, como o boletim 100 (Trani *et al.*, 2022), resultará em menor produção de sementes por não atender as necessidades da planta para a produção de sementes.

A produção de sementes variou de 10,2 a 14,2 g por planta, inferior ao relatado por Bezerra *et al.* (2023) que obtiveram média de 19,1 g por planta, com a cultivar tipo crespa Vera cultivada em função da aplicação foliar de cálcio e boro; e superior ao observado por Kano *et al.* (2012a), que obtiveram média de 4,8 g por planta, com a cultivar tipo crespa Verônica e Contreras *et al.* (2008) que obtiveram média de 5,27 g por planta, com a cultivar Tango. Para Souza *et al.* (2019), as produtividades de alface variam consideravelmente dependendo da cultivar, do local de produção e das condições climáticas, e mudanças podem ocorrer de ano para ano no mesmo período, afetando o desenvolvimento das plantas e, portanto, esses fatores também podem exercer influência sobre a produção de sementes.

Quanto ao manejo da adubação, não foi observada diferença (Tabela 6), mostrando que estas fontes de nutrientes, principalmente o fósforo em que se estudou duas doses, não diferem para a produção de sementes em alface. Cardoso *et al.* (2019) também não observaram diferença na produção de brócolis ao comparar um adubo inorgânico de rápida liberação (superfosfato triplo) com o termofosfato quando se realizou adubação com composto orgânico. Porém, quando não se utilizou composto orgânico no plantio, o superfosfato resultou em maior produtividade. No entanto, ao se plantar beterraba e chicória nas mesmas parcelas onde avaliaram o brócolis para analisar o efeito residual destes adubos fosfatados, Cardoso *et al.* (2024) obtiveram maior produtividade nas duas espécies nas parcelas anteriormente adubadas com superfosfato triplo, tanto sem como com o composto orgânico. Considerando-se que o termofosfato é uma fonte de liberação mais lenta, associado ao elevado poder de adsorção de fósforo nos solos tropicais, esperava-se que o termofosfato pudesse resultar em melhores resultados, o que não foi observado nesta pesquisa nem nas pesquisas citadas. Inclusive, na ausência de adubação com composto orgânico, Cardoso *et al.* (2019) obtiveram maior teor de P ao final do ciclo do brócolis nas parcelas adubadas com o superfosfato triplo.

No cultivo da alface para o consumo *in natura* o potássio, nitrogênio e o cálcio foram os nutrientes mais acumulados pelas plantas (Kano *et al.* 2012b; Tamelini *et al.*,

2024). No entanto, nas sementes a ordem de acúmulo foi diferente, com o nitrogênio, potássio e fósforo aparecendo em maiores quantidades (Bezerra *et al.*, 2023; Quadros *et al.*, 2010 e Kano *et al.*, 2006). O fósforo tem função estrutural, ao integrar ácidos nucleicos, carboidratos, coenzimas e fosfolipídios, e desempenha papel importante nos processos de absorção de outros nutrientes, armazenamento e transferência de energia, fotossíntese, multiplicação de células e síntese de outros compostos (Malavolta, 1980). Sua carência leva ao baixo florescimento (Prado, 2020), e, conseqüentemente, reduz a produção de sementes.

Os manejos e as doses de fósforo não afetaram a massa de mil sementes (Tabela 4), com média de 0,92g (Tabela 5). Vários autores têm relatado que o manejo da adubação não afeta a massa de mil sementes de alface (Kano *et al.*, 2006, 2012a; Cardoso *et al.*, 2011; Quadros *et al.*, 2012; Martins *et al.*, 2022; Bezerra *et al.*, 2023). Quanto aos valores observados, são semelhantes aos encontrados pelos autores citados.

Delouche (1980) ressaltou a capacidade das plantas em ajustar a produção e qualidade das sementes mesmo em condições adversas (neste caso, baixo teor de fósforo no solo), sendo a produção mais facilmente afetada por alguma deficiência nutricional do que a massa de mil sementes e a qualidade fisiológica (germinação e vigor). Sob o ponto de vista evolucionário, esse fato tem um alto valor para a sobrevivência.

Ressalta-se que neste trabalho usou-se sementes beneficiadas, pois as sementes chochas foram eliminadas durante o beneficiamento para retirada das impurezas com peneiras e por diferença de densidade, obtendo-se as sementes que seriam comercializadas, o que também justifica a ausência de diferença na massa de mil sementes.

Para o teor de nutrientes nas sementes, foi observado diferença significativa entre as fontes de P_2O_5 estudadas apenas para o nitrogênio, com a fonte convencional se sobressaindo em relação a fonte orgânica. As doses de fósforo não afetaram os teores de nutrientes nas sementes (Tabela 6). Kano (2006), avaliando doses de fósforo na produção de sementes de alface, não observaram diferença significativa no teor de fósforo, potássio e cálcio nas sementes. Também Kano *et al.* (2011), ao avaliarem a produção e a qualidade de sementes de alface da cultivar Verônica,

observaram que os teores de macronutrientes nas sementes não foram influenciados pelas doses de K_2O aplicadas em cobertura.

O teor de nitrogênio nas sementes de alface foi cerca de 23,8% maior no manejo convencional ($44,7 \text{ g kg}^{-1}$) quando comparado com o manejo orgânico (Tabela 6). A diferença na concentração de nitrogênio pode estar relacionada à disponibilidade desse nutriente em função da fonte utilizada. No manejo convencional, o nitrogênio foi fornecido na forma de ureia, estando prontamente disponível para as plantas. Já na torta de mamona, fonte utilizada no manejo orgânico, a sua disponibilidade depende do processo de mineralização da matéria orgânica. Contudo, é importante ressaltar que, mesmo com uma concentração de nitrogênio mais elevada na semente com a fonte convencional (superfosfato triplo), não houve diferença significativa na produção, na qualidade e no vigor das sementes em relação aos manejos.

Tabela 6- Teor de nutrientes em sementes de alface em função de fontes e doses de fósforo

Fontes	Teor de nutrientes (g kg^{-1})					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Orgânica	36,1 b	7,9 a	9,4 a	3,5 a	3,8 a	2,0 a
Convencional	44,7 a	8,3 a	9,7 a	3,9 a	3,8 a	2,1 a
Doses de P_2O_5						
800	38,2 a	8,1 a	10,0 a	3,9 a	3,8 a	2,0 a
320	42,6 a	8,1 a	9,1 a	3,5 a	3,8 a	2,1 a

*As médias seguidas por letras diferentes na coluna diferem entre si a ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F.

Em ambos os manejos, orgânico e convencional, o teor de nutrientes nas sementes seguiu a mesma ordem decrescente: $N > K > P > Mg > Ca > S$, com cálcio e magnésio apresentando teores muito próximos. A mesma sequência foi observada nas diferentes doses de fósforo aplicadas. Kano (2006), ao avaliar o efeito das doses de fósforo na produção, acúmulo e qualidade de sementes de alface, com a cultivar Verônica, também observou a mesma ordem de teor de macronutrientes nas sementes. Kano *et al.* (2011) registraram essa mesma ordem, e os teores de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre foram 40, 6, 6, 2, 3 e 1,7 g

kg⁻¹, respectivamente, valores próximos, porém inferiores aos observados neste experimento.

1.4 CONCLUSÕES

A produção de sementes foi maior na dose de 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅.

O manejo (fonte do adubo), orgânico ou convencional, não influenciou a produção de sementes.

A massa de mil sementes e a qualidade (germinação e vigor) das sementes não foram afetadas pelas doses de fósforo ou manejos estudados.

O teor de nutrientes na semente decresceu na seguinte ordem: N > K > P > Mg > Ca > S.

REFERÊNCIAS

- ALBORNOZ, F.; VILCHES, I.; CONTRERAS, S. Managing lettuce seed quality through nitrogen nutrition in soilless production. **Scientia Horticulturae**, v. 252, 2019, p. 169-175.
- BEZERRA, S. R. B. **Curva de crescimento e desenvolvimento de plantas de brócolis e rúcula, e a absorção e o acúmulo de nutrientes para a produção de sementes em sistema orgânico**. Tese (Doutorado em Agronomia). Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, 2024, 88p.
- BEZERRA, S. R. B.; MARQUES, I. B.; BARDIVIESSO, E. M.; PELVINE, R. A.; AGUILAR, A. S.; CARDOSO, A. I. I. Application of calcium and boron directed to inflorescences in production, quality and nutrient accumulation in lettuce seeds. **Horticultura Brasileira**, v. 41, 2023, e2427.
- BRASIL. **Regras para análise de sementes**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento: Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: MAPA/ACS, 2009. 399 p.
- CARDOSO, A. I. I.; CLAUDIO, M. D. T. R.; MAGRO, F. O.; FREITAS, P. G. N. Phosphate fertilization on production and quality of cauliflower seeds. **Ciência Rural**, v. 46, n. 8, 2016, p. 1337-1343.
- CARDOSO, A. I. I.; SILVA, P. N. L.; COLOMBARI, L. F.; LANNA, N. B. L.; FERNANDES, D. M. Phosphorus sources associated with organic compound in broccoli production and soil chemical attributes. **Horticultura Brasileira**, v. 37, 2019, p. 228-233.
- CARDOSO, A.I.I.; FERREIRA, K.P.; VIEIRA Jr, R.M.; ALCARDE, C. Changes in soil properties managed with organic compost and its effect on lettuce seed quality. **Horticultura Brasileira**, v.29, n.4, 2011, p.594-599.
- CARDOSO, A.I.I.; SILVA, P.N.L.; FERNANDES, D.M.; LANNA, N.B.L.; COLOMBARI, L.F.; NAKADA-FREITAS, P.G. Residual effect of phosphorus sources on the presence and absence of organic compost in the production of beet and chicory in subsequent cultivation of broccoli. **Horticultura Brasileira**, v.42, 2024, e2543.
- CARVALHO, J. B.; MOTA, J. M. N.; DE ALVARENGA, C. B.; MACIEL, G. M.; DE ANDRADE SILVA, A.; BORBA, M. E. A. Produção e qualidade fisiológica de sementes de alface cultivada com adubação orgânica e mineral. **Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 60, n. 1, 2017, p. 70-76.
- CONTRERAS, S.; BENNETT, M. A.; TAY, D. Restricted water availability during lettuce seed production decreases seed yield per plant but increases seed size and water productivity. **American Society for Horticultural Science**, v. 43, n. 3, 2008, p. 837-844.
- DELOUCHE, J.C. Environmental effects on seed development and seed quality. **American Society for Horticultural Science**, v.15, 1980 p.775-780.

FERREIRA, D. F. Sisvar: A computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.35, 2011, p.1039-1042, 2011.

FRANCO, J. R.; DAL PAI, E.; CALÇA, M. V. C.; RANIERO, M. R.; DAL PAI, A.; SARNIGHAUSEN, V. C. R.; ROMÁN, R. M. S. Atualização da normal climatológica e classificação climática de Köppen para o município de Botucatu-SP. **Irriga**, v. 28, n. 1, 2023, p. 77-92.

KANO, C. **Doses de fósforo no acúmulo de nutrientes, na produção e na qualidade de sementes de alface**. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006, 121 p.

KANO, C.; CARDOSO, A. I. I.; BÔAS, R. L. V. Phosphorus rates on yield and quality of lettuce seeds. **Horticultura Brasileira**, v. 30, n.4, 2012a, p. 695-698.

KANO, C.; CARDOSO, A. I. I.; BOAS, V.; LYRA, R. Nutrient absorption and response of lettuce to phosphorus fertilization. **Biotemas**, v.25, n.3, 2012b, p. 39-47.

KANO, C.; CARDOSO, A.I.I.; HIGUTI, A.R.O.; VILLAS BÔAS, R.L. Potassium rates in the lettuce seed production and quality. **Horticultura Brasileira**, v.24, n.3, 2006 p.356-359.

KANO, C.; CARDOSO, A.I.I.; VILLAS BÔAS, R.L. Nutrients uptake by lettuce plants for seed production. **Horticultura Brasileira**, v.29, n.1, 2011, p.70-77.

MAGUIRE, J.D. Speed of germination-aid in selection for seedling emergence and vigor. **Crop Science**, v.2, n.1, 1962, p.176-177.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. Princípios, métodos e técnicas de avaliação do estado nutricional. In: MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. (org.) **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. p. 115-230.

MAPA. **Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos**. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: MAPA, 2017. 240 p.

MARTINS, B.N.M.; JORGE, L.G.; COLOMBARI, L.F.; BARDIVIESSO, E. M.; NASSER, M.D.; SOUSA, M.C.; CARDOSO, A.I.I. Doses of sulfur at topdressing and organic compost supply at planting in the production, quality and content of macronutrients in lettuce seeds. **Bioscience Journal**, v.38, 2022, e38063.

PRADO, R. D. **Nutrição de plantas**. (2.ed.). São Paulo: Editora Unesp. 2020.

QUADROS, B. R.; MAGRO, F. O.; CORRÊA, C. V.; CARDOSO, A. I. I. Accumulation of nutrients in lettuce seeds in function of organic levels with and without phosphorus added in soil. **Revista Cultivando o Saber**. v. 3, n. 2, 2010, p. 106-115.

QUADROS, B.R.; CORREA, C.V.; CARDOSO, A.I.I. Influence of organic compost and phosphorus on lettuce seeds. **Semina**, v.33, 2012, p. 2511-2518.

SANTOS, H. G.; SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.;

OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 353 p.

SHAHINUL, M.; HUSSAIN, M. J.; SALIM, M. M. R.; AHMED, B.; RAHMAN, M. Determination of optimum rate of nitrogen, phosphorus, potassium and boron for leaf and seed yield of lettuce. **Bangladesh Journal of Agricultural Research**, v.45, n.4, 2020, p.455-471.

SOFFER, H.; SMITH, O.E. Studies on lettuce seed quality: V. nutritional effects. **Journal American Society for Horticultural Science**, v.99, n.5, 1974, p.459-463.

SOUZA, J. T. A.; COSTA, C. A. D.; BRANDÃO, D. D. S.; MENEZES, J. B. D. C.; NASCIMENTO, W. M.; CARDOSO, W. J. Yield and quality of seeds of lettuce genotypes produced under organic management. **Journal of Seed Science**, v. 41, n. 3, 2019, p. 352-358.

TAMELINI, B. R.; SOUZA, E. P. D.; ALVES, T. N.; CARDOSO, A. I. I. Sources and Doses of Phosphorus in the Production of Red-Leaf Lettuce in an Organic Farming System. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 67, 2014, p. e24230761.

TRANI, P. E.; RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; FIGUEIREDO, G. J. B. Hortaliças. In: CANTARELLA, H. et al. (org.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 2022. p. 339-424.

CAPÍTULO 2¹

CURVA DE CRESCIMENTO E ACÚMULO DE NUTRIENTES EM ALFACE PARA PRODUÇÃO DE SEMENTES EM SISTEMA ORGÂNICO

RESUMO

A produção de sementes em sistemas de cultivo orgânico ainda carece de muitas informações sobre fertilização e requisitos nutricionais. Assim, o objetivo deste estudo foi determinar a curva de acúmulo de matéria seca e macronutrientes em alface para produção de sementes, visando o cultivo em sistema orgânico. Os tratamentos consistiram em duas doses de fósforo (320 e 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅, fonte termofosfato). As plantas de alface crespa, cultivar Solaris, foram coletadas em oito estádios (0, 14, 28, 42, 56, 70, 84 e 98 dias após o transplante — DAT) para análise das características propostas. Foi ajustada uma curva de regressão sigmoide não linear, e os resultados demonstraram crescimento contínuo das plantas, acompanhado de aumento gradual da matéria seca ao longo do período experimental, independentemente da dose de fósforo estudada. A parte vegetativa da alface apresentou crescimento inicial lento, seguido de aceleração até o início da floração (70 DAT) e estabilização após esse período. A parte reprodutiva da alface iniciou o crescimento a partir de 56 DAT, aumentando a demanda diária por nutrientes até o final da maturação das sementes e colheita aos 98 DAT. Na dose de 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅, a planta de alface acumulou 1.527,7; 308,2; 2.922,6; 1.658,4; 416,0; e 197,6 mg por planta de N, P, K, Ca, Mg e S, respectivamente. Na dose de 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅, a planta acumulou 1.743,1; 256,9; 2.575,7; 1.210,2; 358,8; e 185,5 mg por planta de N, P, K, Ca, Mg e S, respectivamente. A maior demanda de nutrientes pela planta ocorreu entre 55 e 88 DAT.

Palavras-chave: *Lactuca sativa* L.; adubação orgânica; cultivo protegido; nutrição de plantas; fósforo.

¹Capítulo redigido e publicado de acordo com as normas do periódico Horticulturae

2.1. Introduction

The production of lettuce (*Lactuca sativa* L.) under organic systems has been gaining increasing interest, mainly due to the growing demand for healthy and environmentally sustainable food. However, despite the expansion of this sector, the organic horticulture production chain in Brazil still faces significant challenges, such as the shortage of seeds produced in the organic system that are adapted to the country's different climates and regions. Seeds play a fundamental role in the consolidation of organic agriculture, as they constitute the starting point for all production and directly influence the adaptation of crops to management conditions without the use of synthetic inputs.

The lack of varieties developed or multiplied under organic management compromises not only productivity, but also the authenticity and credibility of the organic production system. Due to this limitation, the use of conventional seeds with or without pesticide treatment is still permitted in the organic production system. In this context, it becomes essential to intensify studies focused on organic seeds production, to identify more appropriate management, achieving productivity, aiming to strengthen the autonomy of farmers, guarantee traceability and ensure the sustainability of the production system.

One of the key factors for the success of this cultivation system is the proper management of nutrients, since the use of synthetic fertilizers is not allowed, and efficient use of natural resources is essential.

Thus, in this context, understanding the dynamics of the nutrient uptake and accumulation at different growth stages of the plant allows the identification of periods of greater demand for essential elements and the correction of possible deficiencies throughout the crop cycle [1]. Thus, the plant growth curve stands out as an essential tool in developing an efficient fertilization program, directly impacting the production and the sustainability of agroecosystems.

In some vegetable species, the crop cycle is extended when the goal is seed production, and nutrient demand tends to increase as a result of flowering and fruiting, especially in species where the vegetable product is harvested before flowering, such as herbaceous vegetables [2].

Although scarce, there are some studies on fertilization and nutrient uptake in lettuce seed production, but most have been conducted using inorganic fertilizers under conventional systems. Due to the increasing consumer demand for organically produced goods worldwide, there is a greater need for research and techniques that enable vegetable and seed production with minimal or no use of mineral fertilizers and pesticides [3].

Despite the significant market presence of organically grown vegetables, the production of lettuce seeds under ecological-based systems is still underexplored. As a result, producers are often forced to use the seeds from conventional systems [4], highlighting the need for more information on nutrient accumulation aimed at seed production under organic management. The organic seed production of lettuce represents a significant step toward more sustainable and responsible agriculture, as well as full certification of the production process.

Phosphate fertilization plays a crucial role in lettuce seed production, since phosphorus (P) is an essential nutrient for several metabolic functions that directly impact growth and production. Although there is information on the nutritional requirements of lettuce, little research has focused on the productivity and seed quality in relation to phosphorus doses and sources. The main sources of phosphorus in fertilization are simple and triple superphosphates. However, these cannot be used in the organic system. Among the phosphate fertilizer options allowed in the organic system is thermophosphate, which has the characteristic of slower P dissolution in relation to soluble phosphate sources [5], and may be a good option for the production of lettuce seeds, with release throughout the cycle.

Despite the numerous studies in the area of vegetable nutrition, studies on seed production, especially in organic systems, are still scarce, limiting the production potential of crops in this system. Therefore, understanding the dynamics of nutrient absorption and accumulation is important for the development of fertilization programs, seeking sustainability and productive efficiency of crops, as well as saving natural resources.

Therefore, the objective of this study was to determine the dry matter and macronutrient accumulation curve in lettuce for seed production under organic cultivation with two doses of phosphorus.

2.2 Materials and Methods

2.2.1. Experimental Site and Treatments

The research was carried out at the Experimental Farm of São Paulo State University (UNESP), located in the municipality of São Manuel, São Paulo, Brazil (22°46'04.9" S, 48°34'19.4" W, and 709 m altitude), from 29 September 2023, to 2 February 2024. According to the Köppen classification, the region's climate is tropical (Aw type), with a rainy summer and dry winter [6].

The experiment was conducted in a protected environment, in an arch greenhouse, with a ceiling height of 2.5 m, measuring 7 m in width and 20 m in length, covered with high-density polyethylene film (150 µm) and the sides closed with anti-aphid screen. During the experimental period, the external average maximum, mean, and minimum temperatures were 30.3 °C, 23.7 °C, and 18.9 °C, respectively; The relative humidity averaged 69.1%, and the daily average rainfall was 4.6 mm.

The soil was classified as a Typic Dystrophic Red Latosol. Soil samples were collected before and after the experiment and sent to the Department of Forest Science, Soil, and Environment at São Paulo State University (UNESP), for chemical analysis (Table 1). Soil correction was performed based on the analysis results to raise the base saturation to 80%, following the recommendation by Trani [7].

Table 1. The soil analysis before and after the experiment.

	pH _(CaCl2)	OM *	P _{res}	SB	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CTC	V
	g dm ⁻³		mg dm ⁻³						%
Before soil correction	4.6	2	13	27	1.1	20	6	45	59
After soil correction	5.8	6	13	50	1.3	36	12	62	80
Dose (kg ha ⁻¹ of P ₂ O ₅)									
320	6.5	7	48	71	0.7	52	18	82	86
800	6.8	10	157	90	2.0	60	28	98	91

* Organic matter.

Two phosphorus doses were evaluated (320 and 800 kg ha⁻¹ of P₂O₅), supplied through a source permitted in organic systems: Yoorin[®] thermophosphate. The doses were defined according to Kano et al. [8] for seed production (800 kg ha⁻¹ of P₂O₅) and the fertilization recommendation for lettuce grown for fresh consumption (320 kg ha⁻¹ of P₂O₅) in the state of São Paulo [7].

Eight plant samplings were performed throughout the crop cycle, at 0, 14, 28, 42, 56, 70, 84, and 98 days after transplanting (DAT), with three replications and one plant per plot at each sampling point, except on the transplanting day (0 DAT), when 120 seedlings were sampled. Solaris cultivar (pelleted seeds, 92% germination) seedlings were produced in 200-cell trays using Carolina substrate and transplanted on 27 October 2023, into 8 L pots. The pots were spaced 1.0 m between the rows and 0.5 m between the plants.

Planting and supplemental fertilization were carried out based on the soil analysis and according to the recommendations by Trani [7], except for phosphorus, which followed the experimental phosphorus doses. One week before planting fertilization supplied 0.16 g of nitrogen (N) and 0.48 g of potassium (K₂O) per plant, using castor bean cake and potassium sulfate, respectively. Additionally, 80 g of chicken manure per plant was applied as a source of organic matter. Phosphorus fertilization was carried out using Yoorin[®] thermophosphate, at rates of 17.8 and 7.1 g per plant, corresponding to 800 and 320 kg ha⁻¹ of P₂O₅, respectively.

In supplemental fertilization, N, P₂O₅, and K₂O were supplied at doses of 0.18, 0.06, and 0.12 g per plant, respectively, using the same sources (castor bean cake, Yoorin[®] thermophosphate, and potassium sulfate) as in the planting fertilization. Top dressing fertilization was performed weekly until one week before the seed harvest. The chemical analysis of the fertilizers was carried out according to the Official Analytical Methods Manual for Fertilizers and Soil Amendments [9], and is shown in Table 2.

Table 2. The results of the chemical analysis of the fertilizers: Yoorin® thermophosphate (YT), castor bean cake (CBC), and chicken manure (CM).

Sources	N	P ₂ O ₅ Total	K ₂ O	S	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	C/N Ratio
YT	-	18.0	ND **	ND	-	-	-	-	-	-	-
CBC	5.38	1.1	0.73	0.16	0.84	0.41	33	1501	101	114	8/1
CM	1.15	1.3	1.57	0.20	1.14	0.47	150	9790	324	137	-

* Total contents; ** Not detected.

Table 3 presents the estimated amounts of the macronutrients potentially supplied per hectare during pre-planting, topdressing, and cumulatively, based on the application of the organic fertilizers throughout the crop cycle.

Table 3. The amount of macronutrients potentially supplied per hectare before planting, during topdressing, and in total for the treatments with organic fertilizers.

Dose	N	K ₂ O	P ₂ O ₅	Ca	Mg	S
kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅			kg ha ⁻¹			
			Before planting			
320	270.0439.4		589.0	234.2	97.3	77.2
800	270.0439.4		1069.0	234.2	97.3	77.2
			Supplemental fertilization			
320	630.0420.0		210.0	60.0	30.0	126.0
800	630.0420.0		210.0	60.0	30.0	126.0
			Total			
320	900.0859.4		799.0	294.2	127.3	203.2
800	900.0859.4		1279.0	294.2	127.3	203.2

Weed management was conducted manually to minimize competition. At 70 days after transplanting (DAT), the plants were supported with bamboo stakes to prevent lodging caused by the increased biomass associated with the seed development. Irrigation was carried out using a localized drip system, with water applied in three daily intervals to ensure adequate soil moisture. On average, 3 to 7 mm of water was applied with each application, depending on the development stage of the plant, and the recommendations of Marouelli [10] were observed for the lettuce seed production.

2.2.3 Evaluated Characteristics

For every sampling interval, the plants were harvested by cutting at the base of the stem, at the soil level. The following measurements were taken: the plant height, the stem diameter, and the number of leaves. The harvested plants were separated into vegetative parts (leaves and stem) and reproductive parts (from 56 days after transplanting—DAT) and washed with running water followed by distilled water. In the final sampling, at 98 DAT, the seeds were separated from the remaining reproductive structures. Seed harvest was performed when

approximately 70% of the achenes exhibited white pappus bristles on the inflorescence.

After washing, at each sampling point, the leaves, stem, and reproductive parts were placed separately in Kraft paper bags and dried in a forced-air circulation oven at 65 ± 0.5 °C until reaching a constant weight. The material was then weighed using a precision balance (± 0.01 g) to determine the dry mass, with the results expressed in g plant^{-1} .

The dried samples were ground in a stainless steel Willey-type mill, stored in paper bags, and sent to the Plant Analysis Laboratory of the Department of Forest Science, Soil, and Environment at FCA/UNESP for the macronutrient determination in leaves, stem, and reproductive parts. Nutrient analyses were conducted following the procedures described by Malavolta [11], using sulfuric acid digestion for the nitrogen and nitric-perchloric acid digestion for the phosphorus, potassium, calcium, magnesium, and sulfur. The results were expressed in g kg^{-1} of dry matter and were used to calculate the macronutrient accumulation.

The accumulated nutrient quantities were obtained by multiplying the concentration of each nutrient by the corresponding dry mass of the sample, with the results expressed in mg plant^{-1} .

The daily accumulation rates for the vegetative, reproductive, and total parts were calculated based on the estimated accumulation of each nutrient by subtracting the values of two consecutive sampling days. This calculation was performed across the entire crop cycle, resulting in daily accumulation values expressed in $\text{mg plant}^{-1} \text{ day}^{-1}$ for each macronutrient.

2.2.4. Statistical Analysis

Initially, the data was analyzed for normality and variance, with a significance level of 5%. To estimate the growth and macronutrient accumulation, Origin software (Pro), Version 2024 was used. A nonlinear sigmoid regression curve with three parameters was fitted according to the following model:

$$y = a/[1 + e^{-k(x - x_0)}],$$

where: y = the mean value of the evaluated trait; a = the asymptotic maximum value of the curve; k = the adjustment parameter; and x_0 = the inflection point.

2.3. Results

2.3.1. Agronomic Characteristics

The growth cycle of curly lettuce cv. Solaris lasted 98 days from the transplanting to the seed harvest (or 126 days after sowing—DAS), and the growth curve followed a sigmoidal model. The duration of the lettuce cycle for seed production was approximately 2.5 times longer than that of the crop cultivated for fresh consumption, in which the harvest point occurs around 35 DAT. The emergence of the first flower buds began at 56 DAT (or 84 DAS), the flowering started at 70 DAT (98 DAS), and the opening of flowers in most plants occurred around 84 DAT (112 DAS).

The lettuce plants exhibited three distinct growth stages. The most significant increases in the plant height and stem diameter were observed after 42 DAT, coinciding with the onset of the stem elongation. Regarding the leaf number, there was a sharp increase between 28 and 56 DAT under the 800 kg ha⁻¹ P₂O₅ treatment, and between 28 and 70 DAT under the 320 kg ha⁻¹ P₂O₅ treatment, with the leaf emission rate decreasing thereafter (Figures 1C, 2D, respectively). At the fresh market harvest point (35 DAT), the plants had an average of 41 and 27 leaves under the respective treatments.

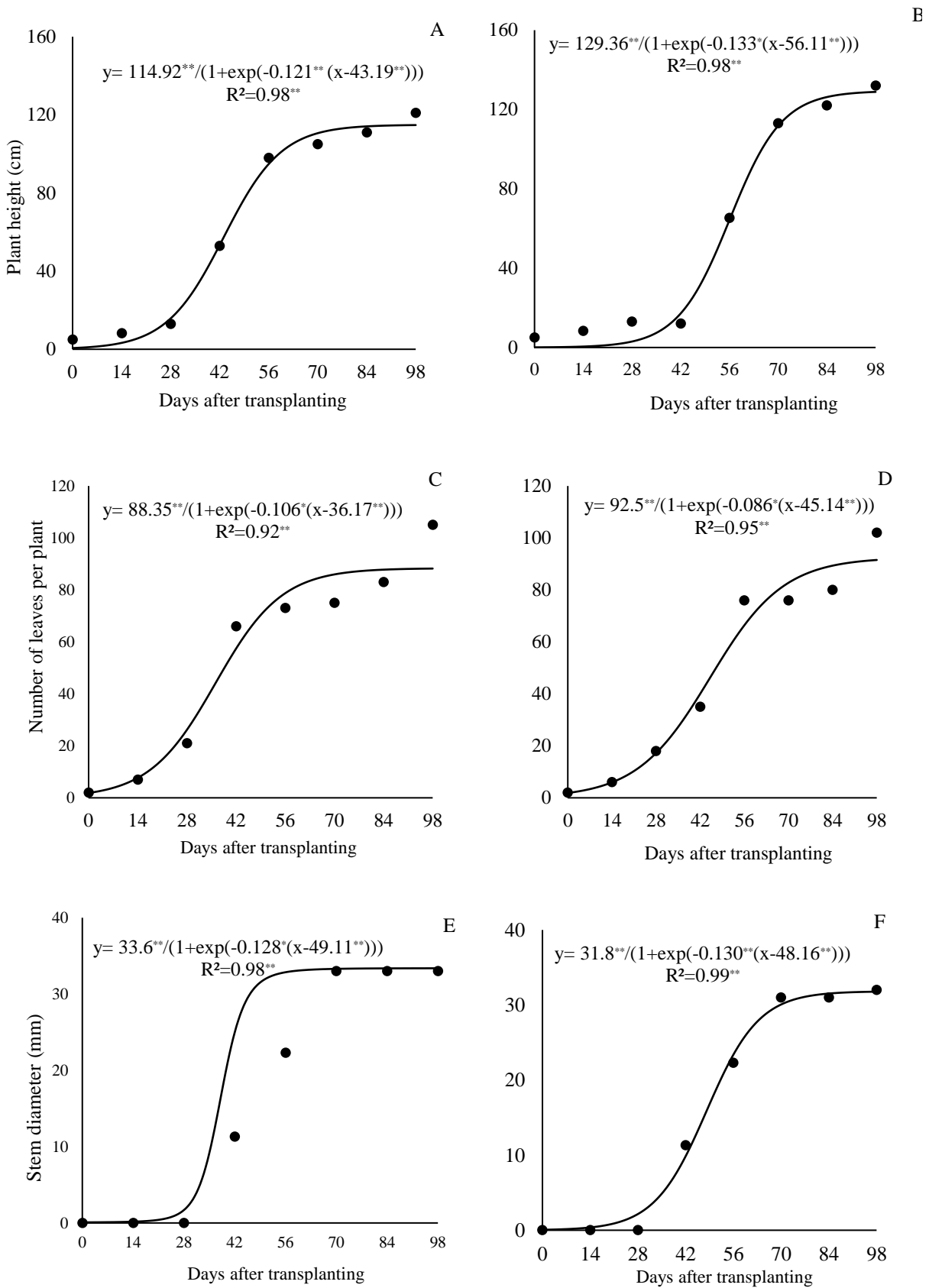


Figure 1. Plant height, number of leaves per plant, and stem diameter of lettuce plants under organic fertilization management with doses of 800 kg ha⁻¹ of P₂O₅

(A,C,E) and 320 kg ha⁻¹ of P₂O₅ (B,D,F). (Caption: ** and *, p<0.01 and p<0.05 of probability, respectively).

At the end of the cycle, the lettuce plants reached 114.7 cm in height (Figure 1A) and had an average of 88 leaves per plant (Figure 1C), and a stem diameter of 33.4 mm (Figure 1E) with the 800 kg ha⁻¹ P₂O₅ dose; and reached 128.8 cm (Figure 1B) and had 91.5 leaves (Figure 1D) and 31.7 mm (Figure 1F) with the 320 kg ha⁻¹ P₂O₅ dose.

2.3.2. Dry Matter Accumulation

The total dry matter accumulation in the lettuce plants grown for the seed production was continuous throughout the crop cycle and could be divided into two distinct stages: the first from the transplanting to 28 days after the transplanting (DAT), and the second from 29 DAT to the seed harvest (98 DAT), for both the phosphorus doses 800 kg ha⁻¹ of P₂O₅ (Figure 2A) and 320 kg ha⁻¹ of P₂O₅ (Figure 2B).

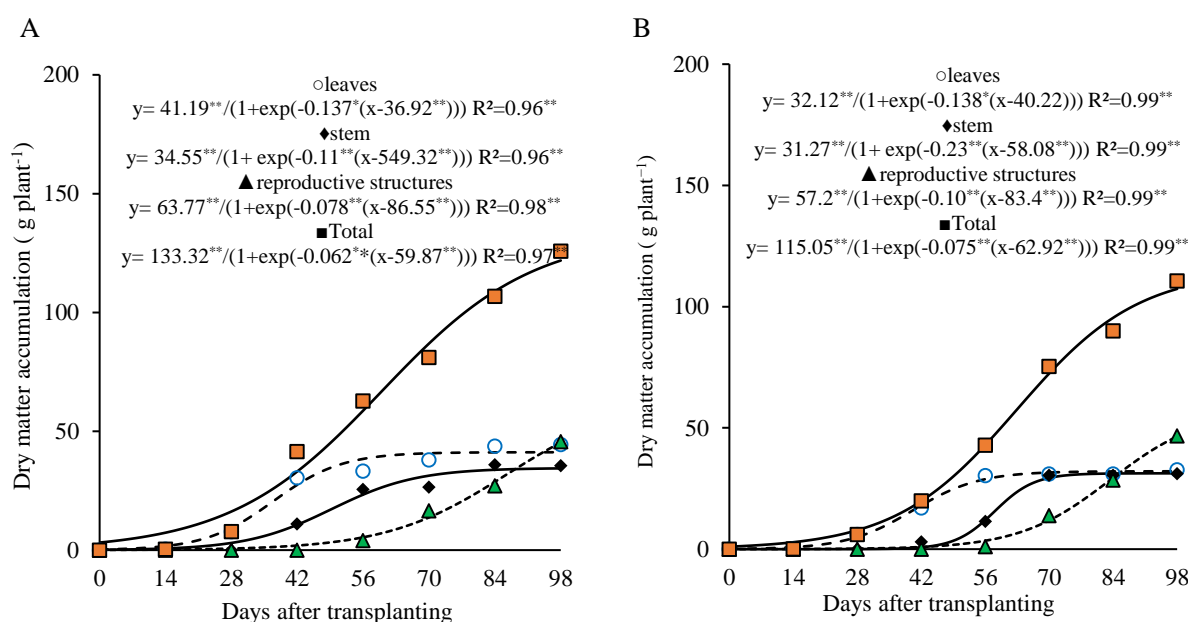


Figure 2. Dry matter accumulation in leaves, stem, reproductive organs, and total of lettuce plants under organic fertilization management and phosphorus doses of 800 (A) and 320 (B) kg ha⁻¹ of P₂O₅. (Caption: ** and *, p<0.01 and p<0.05 of probability, respectively).

The first stage (0 to 28 DAT) was characterized by a low dry matter accumulation, with an average of 5.27 g plant⁻¹ under the 320 kg ha⁻¹ P₂O₅ treatment, representing 4.8% of the total accumulated by the end of the cycle (109.8 g plant⁻¹); and 13.05 g plant⁻¹ under the 800 kg ha⁻¹ P₂O₅ treatment, corresponding to 10.8% of the final accumulated total of 120.8 g plant⁻¹ at 98 DAT.

In the leaves and the stem, under the dose of 800 kg ha⁻¹ of P₂O₅, the dry matter accumulation followed three stages; the first stage occurred from 0 to 28 DAT, the second from 29 to 56 DAT, and the third from 57 to 98 DAT. In the first stage, the plants accumulated 9.37 and 3.02 g plant⁻¹

of dry matter in the leaves and the stem, which represented 22.7% and 8.8% of the total dry matter accumulated by 98 DAT, respectively. During the second stage, the dry matter accumulation was more pronounced, with the plants accumulating 38.4 and 23.3 g plant⁻¹ in the leaves and the stem, accounting for approximately 70% and 60% of the total accumulation, respectively. In the third stage, the plants accumulated 2.9 and 10.9 g plant⁻¹ of the dry matter (7% and 31.7% of the total accumulated by 98 DAT), respectively.

Under the dose of 320 kg ha⁻¹ of P₂O₅, the dry matter accumulation in the leaves and the stem also followed three stages, with the first stage occurring from 0 to 28 DAT (the leaves) and 0 to 42 DAT (the stem), the second from 28 to 56 DAT (the leaves) and 43 to 70 DAT (the stem), and the third from 57 to 98 DAT (the leaves) and 71 to 98 DAT (the stem). In the first stage, the plants accumulated 5.0 and 0.8 g plant⁻¹ in the leaves and the stem (15.65% and 2.42% of the total accumulated by 98 DAT), respectively. In the second stage, the plants accumulated approximately 23.8 and 28.7 g plant⁻¹ in the leaves and the stem, representing 74% and 91% of the total accumulated, respectively.

At the harvest point for fresh consumption, i.e., at 35 DAT, the plants had accumulated 11.1 and 24.9 g plant⁻¹ of dry matter, corresponding to 10.1% and 20.6% of the total dry matter accumulated at the doses of 320 and 800 kg ha⁻¹ of P₂O₅, respectively.

2.3.3. *Macronutrients Accumulation*

At the dose of 800 kg ha⁻¹ of P₂O₅, the nitrogen accumulation in the leaves occurred sharply during the first 42 days after the transplanting (DAT) and then stabilized. The stem showed a more gradual nitrogen accumulation compared to the leaves during the first 42 DAT, followed by a more pronounced increase after 42 DAT, coinciding with a stem elongation due to the formation of the reproductive stalk. In the reproductive part, the nitrogen accumulation was more intense and almost linear from 56 DAT onward, at the time of the floral bud emergence (Figure 3A).

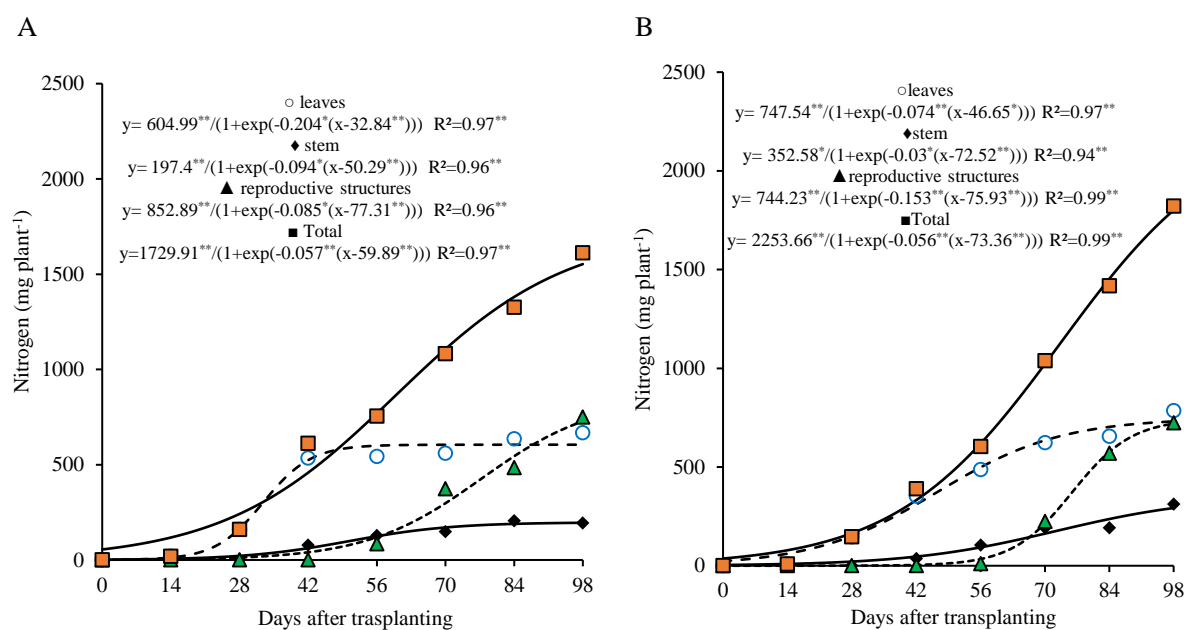


Figure 3. Nitrogen accumulation in different parts of lettuce plants grown for seed production under organic fertilization with 800 (A) and 320 (B) kg ha⁻¹ of P₂O₅. (Caption: ** and *, p<0.01 and p<0.05 of probability, respectively).

At the dose of 320 kg ha⁻¹ of P₂O₅, the nitrogen accumulation in the leaves and the stem increased throughout the cycle, although it was less intense after 70 DAT and did not reach stabilization as observed with the higher dose and in the dry matter data (Figure 2). In the reproductive part, the accumulation became more pronounced after 70 DAT (Figure 3B).

The nitrogen accumulation in the plant (total) followed a continuous growth pattern up to 98 days after transplanting (DAT), fitting a sigmoidal curve. This accumulation could be divided into two distinct stages for both the phosphorus doses, in a similar way to the dry matter accumulation pattern. The first stage occurred from 0 to 28 DAT, during which the nitrogen accumulation reached 198.5 and 171.7 mg per plant—representing approximately 13% and 9.8% of the total at the end of the cycle—for the 800 and 320 kg ha⁻¹ doses, respectively. The daily accumulation rate during this phase averaged 7.0 and 6.1 mg per plant per day.

From 29 to 98 DAT, the nitrogen uptake intensified considerably. During this second stage, the plants accumulated 1329.2 and 1571.5 mg per plant—equivalent to 87.0% and 90.2% of the total nitrogen content—for the 800 and 320 kg ha⁻¹ doses, respectively. The average daily accumulation rates in this phase were 19.0 and 22.45 mg per plant per day (Figure 3A,B).

At the end of the cycle, the total nitrogen accumulation for the 800 kg ha⁻¹ dose reached 1527.7 mg per plant, with 40% allocated to the leaves, 13% to the stem, and 48% to the reproductive structures. A similar distribution was observed under the 320 kg ha⁻¹ dose, with a total nitrogen

accumulation of 1743.17 mg per plant, 42% in the leaves, 17% in the stem, and 41% in the reproductive part (Figure 3A,B).

The overall nitrogen accumulation pattern was similar to that of the total dry matter accumulation, with a limited uptake before 28 DAT and most of the nitrogen being absorbed between 29 and 98 DAT under both the phosphorus treatments (Figure 2A,B).

Interestingly, even though the reproductive structures represented only 37% (Figure 2A) and 34% (Figure 2B) of the total dry mass at 98 DAT for the 800 and 320 kg ha⁻¹ doses, respectively, they accounted for a significant proportion of the total nitrogen accumulation, 48% and 41%, respectively.

The phosphorus accumulation exhibited a pattern similar to that of the nitrogen in the different parts of the plant, with a faster accumulation in the leaves and a more gradual increase in the stem during the first weeks after transplanting. This accumulation stabilized between 42 and 56 days after transplantation (DAT), respectively, and was accentuated in the reproductive structures from 70 DAT (Figure 4A,B).

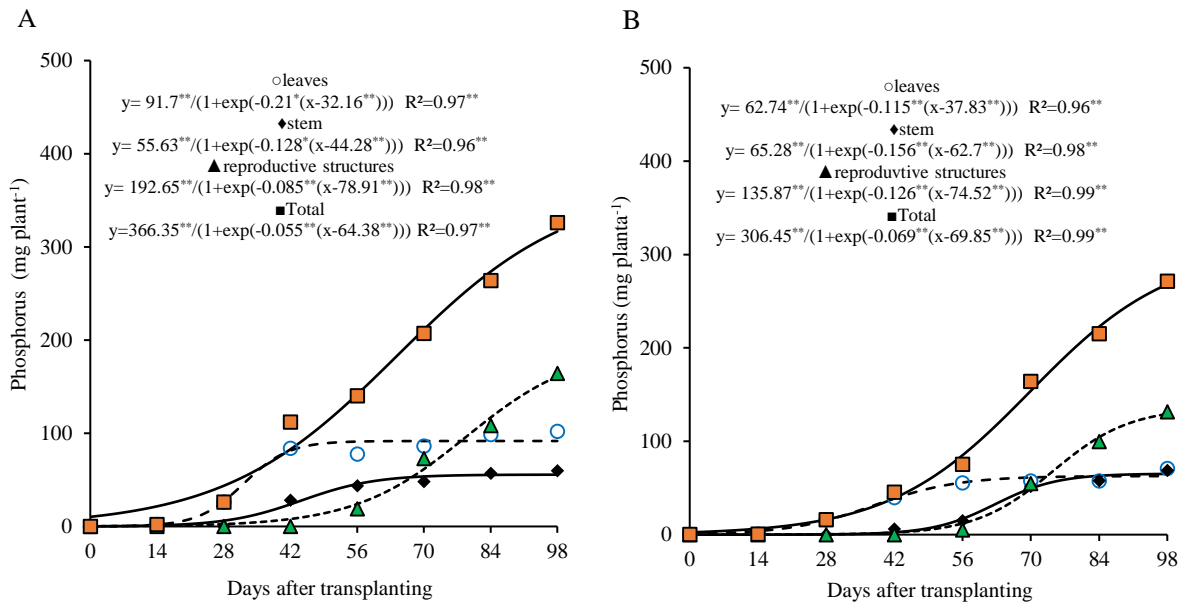


Figure 4. Phosphorus accumulation in different parts of lettuce plants grown for seed production under organic fertilization with 800 (A) and 320 (B) kg ha⁻¹ of P₂O₅. (Caption: ** and *, p<0.01 and p<0.05 of probability, respectively).

For the total phosphorus in the plant, two growth stages were also observed for the 800 kg ha⁻¹ P₂O₅ dose: the first between 0 and 28 DAT, and the second from 29 to 98 DAT. In the first stage, the plant accumulated approximately 12.0% of the total phosphorus (35.7 mg plant⁻¹), with an average of 1.3 mg plant⁻¹ day⁻¹. In the second stage, the phosphorus accumulation was more pronounced, reaching 272.2 mg plant⁻¹ by the end of the period (about 88.4% of the total accumulated), with an average of 3.8 mg plant⁻¹ day⁻¹. At the end of the cycle, the total accumulation reached 308.2 mg plant⁻¹, distributed among the leaves, the stem, and the

reproductive parts in proportions of 30%, 18%, and 52%, respectively (Figure 4A).

For the 320 kg ha⁻¹ P₂O₅ dose, two growth stages were also observed, with the first occurring between 0 and 42 DAT and the second from 43 to 98 DAT. In the first stage, the plant accumulated about 16.9% of the total phosphorus (43.4 mg plant⁻¹), with an average of 1.03 mg plant⁻¹ day⁻¹. In the second stage, the phosphorus accumulation became more pronounced, reaching 213.3 mg plant⁻¹ by the end of the period (approximately 83.1% of the total accumulated), with an average of 3.8 mg plant⁻¹ day⁻¹. At the end of the cycle, the total phosphorus accumulation was 256.9 mg plant⁻¹, distributed among the leaves, the stem, and the reproductive parts in proportions of 25%, 25%, and 50%, respectively (Figure 4B).

For the 800 kg ha⁻¹ P₂O₅ dose, the potassium accumulation in the leaves was pronounced, with the highest increase occurring around 56 DAT, followed by stabilization thereafter. The stem showed a more gradual potassium accumulation, with the growth leveling off after 70 DAT. On the other hand, the potassium accumulation in the reproductive part began to intensify from 70 DAT onward, increasing almost steadily until the end of the cycle (Figure 5A).

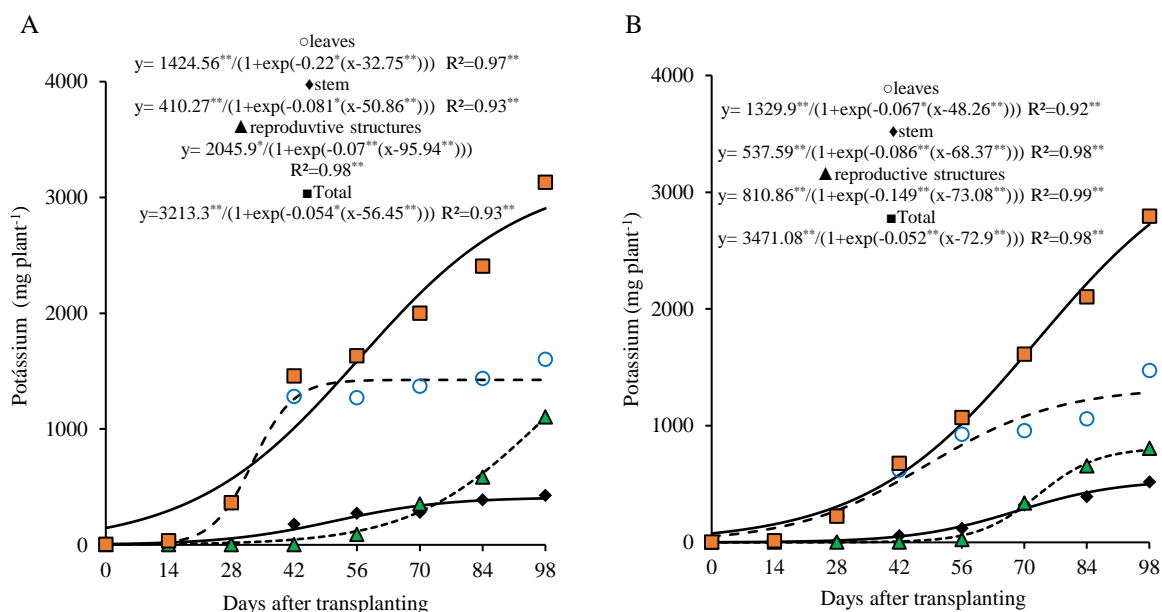


Figure 5. Potassium accumulation in different parts of lettuce plants grown for seed production under organic fertilization with 800 (A) and 320 (B) kg ha⁻¹ of P₂O₅. (Caption: ** and *, $p < 0.01$ and $p < 0.05$ of probability, respectively).

For the 320 kg ha⁻¹ P₂O₅ dose, the sigmoid curve shows a continuous and gradual accumulation of potassium in the leaves and the stem until the end of the cycle (98 DAT), although this was less intense during the last two sampling dates. The potassium accumulation in the reproductive

part began later, from 70 DAT, reaching a maximum of 791.54 mg plant⁻¹ by the end of the cycle (Figure 5B).

The curve of the total potassium accumulation in the plant shows a continuous and significant increase around 98 DAT and can be divided into two stages; the first from 0 to 28 DAT and the second from 29 to 98 DAT for both the doses studied. In the first stage, the plant accumulated 443.8 and 289.3 mg plant⁻¹ (about 15.2% and 11.2% of the total accumulated by the end of the cycle), with averages of 15.8 and 10.3 mg plant⁻¹ day⁻¹ at 800 and 320 kg ha⁻¹ of P₂O₅, respectively. In the second stage, an accumulation of 2478.8 and 2284.9 mg plant⁻¹ was recorded (84.8% and 88.8% of the total accumulated by the end of the cycle), with averages of 38.2 and 32.6 mg plant⁻¹ day⁻¹, respectively.

Calcium showed a marked accumulation in the leaves up to 56 DAT and a gradual increase in the stem throughout the lettuce growth cycle. In the reproductive part, the calcium accumulation became more pronounced from 70 DAT onward, with 66.6% (800 kg ha⁻¹ of P₂O₅) and 83.05% (320 kg ha⁻¹ of P₂O₅) of the total calcium in these parts accumulating after this period (Figure 6A,B).

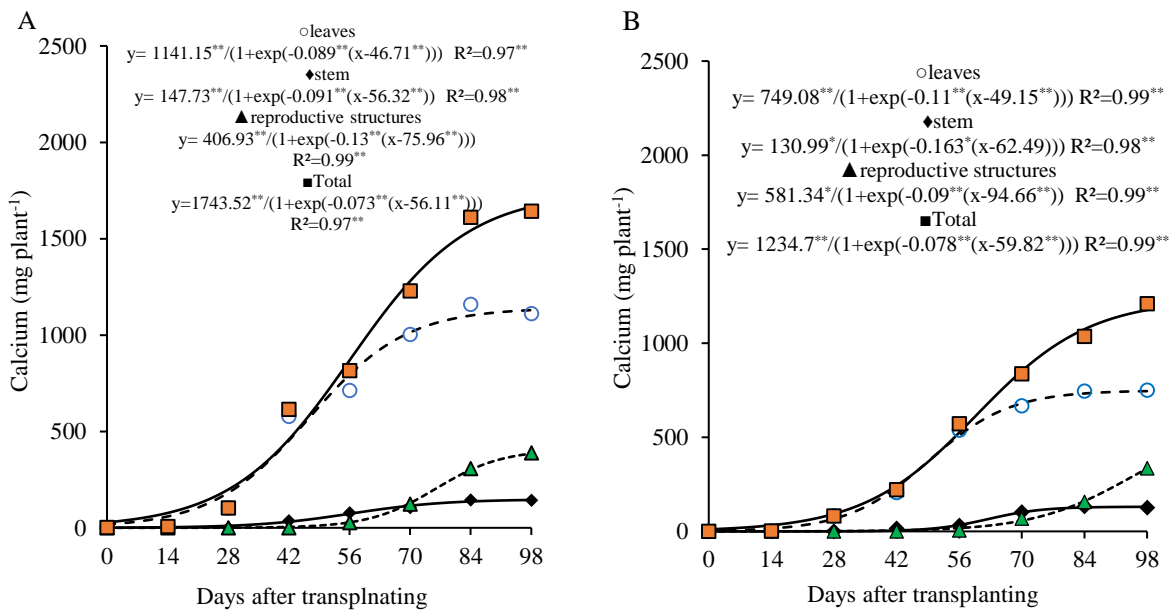


Figure 6. Calcium accumulation in different parts of lettuce plants grown for seed production under organic fertilization with 800 (A) and 320 (B) kg ha⁻¹ of P₂O₅. (Caption: ** and *, p<0.01 and p<0.05 of probability, respectively).

The total calcium accumulation curve shows a continuous increase of up to 98 DAT, with a more marked rate between 28 and 70 DAT, during which the plant accumulated about 64.1% of the total calcium (1063.9 and 776.7 mg plant⁻¹), with an average of 25.3 and 18.5 mg plant⁻¹ day⁻¹ at the doses of 800 and 320 kg ha⁻¹ of P₂O₅, respectively. After 70 DAT, the plant accumulated approximately 24.2% and 30.7% of the total calcium, and the average daily accumulation dropped to 14.4 and 13.3 mg plant⁻¹ day⁻¹ until the end of the cycle, for the doses of 800 and 320 kg ha⁻¹ of P₂O₅, respectively.

At 98 DAT, under the 800 kg ha⁻¹ P₂O₅ dose, the total calcium accumulation was 1658.4 mg plant⁻¹, with approximately 77.0% found in the vegetative part and 23.0% in the reproductive part. Under the 320 kg ha⁻¹ P₂O₅ dose, the total calcium accumulation was 1210.2 mg plant⁻¹, with 72.4% in the vegetative part and 27.6% in the reproductive part.

The magnesium accumulation curve for the 800 kg ha⁻¹ P₂O₅ dose in the leaves and the stem followed a pattern similar to that of the calcium, with more pronounced values in the leaves until 56 DAT and a gradual accumulation in the stem, which reached its maximum at the end of the cycle. In the reproductive part, the magnesium accumulation became more intense after 70 DAT, with approximately 68.2% of the total magnesium in these organs being accumulated after this period. The total magnesium accumulation was slow from the transplanting to 28 DAT, with an average of 1.86 mg plant⁻¹ day⁻¹. From 29 to 98 DAT, the average accumulation rose to 5.14 mg plant⁻¹ day⁻¹, during which about 87.5% of the total magnesium was accumulated. At 98 DAT, the total magnesium accumulation reached 416 mg plant⁻¹, with 63% in the leaves, 9% in the stem, and 29% in the reproductive part (Figure 7A).

At the 320 kg ha⁻¹ P₂O₅ dose, the trend of the total magnesium accumulation was continuous and nearly linear, showing a low initial accumulation, with an average of 1.2 mg plant⁻¹ day⁻¹ until 28 DAT, increasing to 4.6 mg plant⁻¹ day⁻¹ between 29 and 98 DAT. During this second period, 90.5% of the total accumulated magnesium was recorded. At 98 DAT, the total magnesium accumulation was 358.8 mg plant⁻¹, with 57% in the leaves, 11% in the stem, and 32% in the reproductive part (Figure 7B).

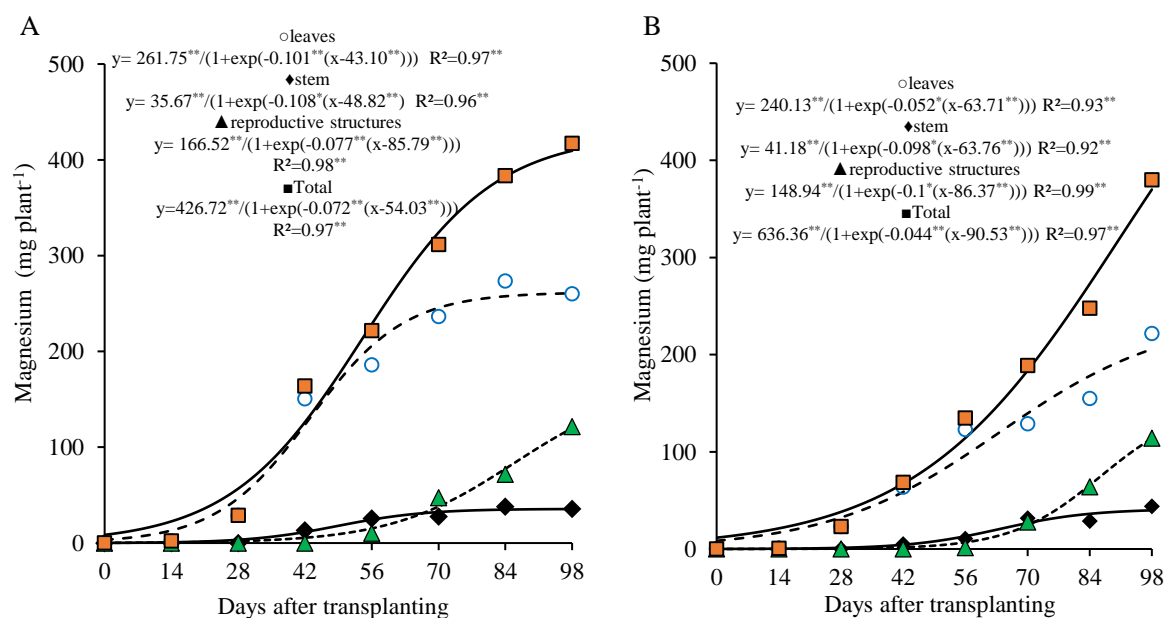


Figure 7. Magnesium accumulation in different parts of lettuce plants grown for seed production under organic fertilization with 800 (A) and 320 (B) kg ha⁻¹ of P₂O₅. (Caption: ** and *, p<0.01 and p<0.05 of probability, respectively).

At the 800 kg ha⁻¹ P₂O₅ dose, the sulfur accumulation in the leaves was more prominent from 0 to 56 DAT, with approximately 73.7% of the maximum accumulated in this organ occurring during this period (55.4 mg plant⁻¹). In the stem, the sulfur accumulation tended to stabilize after 70 DAT, with a slower rate from 70 to 98 DAT, reaching a maximum of 31.4 mg plant⁻¹. In the reproductive part, the accumulation became more marked after 70 DAT, with about 69.3% of the total sulfur in this organ being accumulated during that period, ending the cycle with 91.0 mg plant⁻¹ (Figure 8A).

On the other hand, under the 320 kg ha⁻¹ P₂O₅ dose, the sulfur accumulation in the leaves was more evident between 28 and 70 DAT, with 76.7% of the maximum accumulated during this interval (50.7 mg plant⁻¹). In the stem, the sulfur accumulation also tended to stabilize after 70 DAT, with a slower accumulation until 98 DAT, when a maximum of 37.0 mg plant⁻¹ was observed. In the reproductive part, the accumulation became more expressive after 70 DAT, with approximately 67.4% of the sulfur being accumulated in this period, ending the cycle with 82.0 mg plant⁻¹ (Figure 8B).

Similar to nitrogen, the total sulfur accumulation curve followed the dry matter accumulation pattern, with the highest accumulation occurring from 28 to 98 DAT. During this period, 177.5 and 172.4 mg plant⁻¹ of sulfur were accumulated (representing 89.8% and 93.2% of the total sulfur accumulated by the end of the cycle), with an average of 2.53 and 2.46 mg plant⁻¹ day⁻¹ under the 800 and 320 kg ha⁻¹ P₂O₅ doses, respectively. As observed for the other macronutrients, the sulfur accumulation curve showed a continuous upward trend until 98 DAT, with total accumulations of 197.6 and 185.5 mg plant⁻¹ recorded at the end of the cycle. These values were distributed among the plant organs as follows: 38% and 36% in the leaves, 16% and 20% in the stem, and 46% and 44% in the reproductive parts, for the 800 and 320 kg ha⁻¹ P₂O₅ doses, respectively (Figure 8A,B).

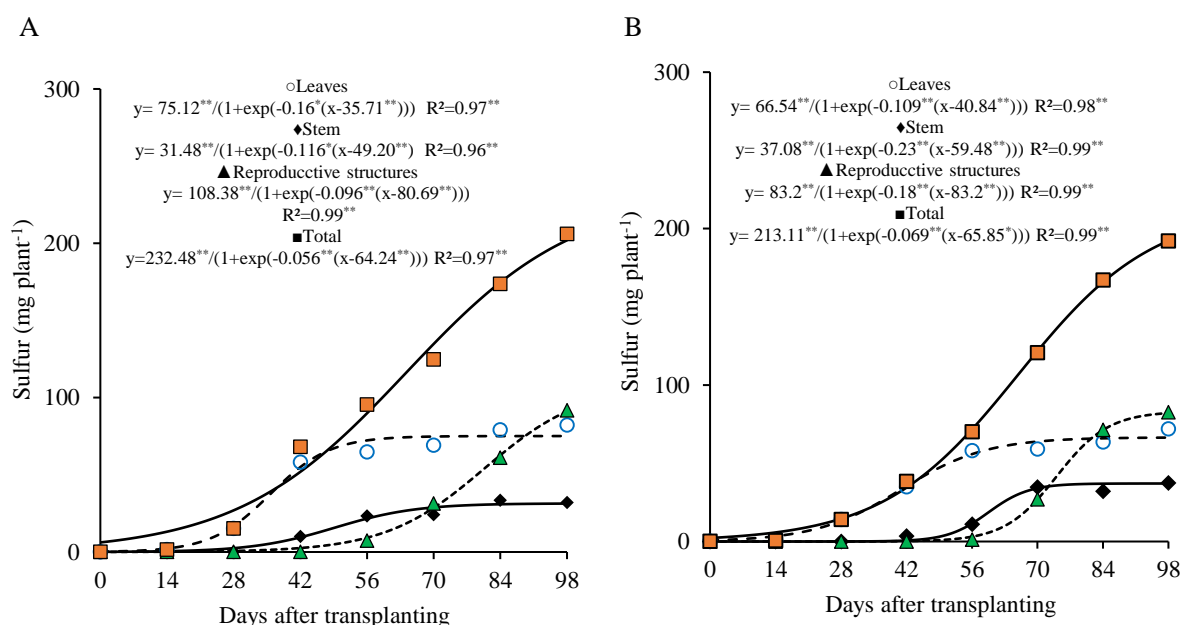


Figure 8. Sulfur accumulation in different parts of lettuce plants grown for seed production under organic fertilization with 800 (A) and 320 (B) kg ha⁻¹ of P₂O₅. (Caption: ** and *, p<0.01 and p<0.05 of probability, respectively).

2.3.4. Daily Accumulation Rate

Analyzing the nutritional demand of the lettuce plants over the days after the transplanting (Figure 9), under fertilization with 800 kg ha⁻¹ of P₂O₅, a rise in the daily accumulation rate was observed throughout the cultivation cycle, reaching a peak—known as the maximum daily accumulation rate (MDAR)—followed by a decline until the end of the cycle. This pattern was evident for all the plant parts (the leaves, the stem, the reproductive structures, and the total plant) and for nearly all the nutrients. However, in the reproductive parts, the daily accumulation rate of the potassium continued to increase, with its maximum observed close to the harvest.

For the plant as a whole, the MDAR occurred between 55 and 65 days after the transplanting (DAT). The maximum daily accumulation rates were 24.6 mg plant⁻¹ day⁻¹ for nitrogen at 60 DAT; 5.0 and 3.2 mg plant⁻¹ day⁻¹ for phosphorus and sulfur, respectively at 65 DAT; 43.4 and 31.8 mg plant⁻¹ day⁻¹ for potassium and calcium at 57 DAT; and 7.7 mg plant⁻¹ day⁻¹ for magnesium at 55 DAT. These results highlight the periods of the greatest nutritional demand throughout the plant's development cycle (Figure 9A).

In the stem, the maximum daily accumulation rates occurred between 43 and 56 DAT. The nitrogen, the magnesium, and the sulfur peaked at 4.6, 1.0, and 0.9 mg plant⁻¹ day⁻¹ at 48 DAT, respectively. The phosphorus reached 1.8 mg plant⁻¹ day⁻¹ at 43 DAT, the potassium reached 8.3 mg plant⁻¹ day⁻¹ at 50 DAT, and the calcium reached 3.4 mg plant⁻¹ day⁻¹ at 56 DAT (Figure 9B).

In the leaves, the highest daily accumulation rates for the nitrogen, the phosphorus, and the potassium were 30.8, 4.8, and 78.2 mg plant⁻¹

day⁻¹, respectively, reached at 33 DAT. The calcium reached its peak later, at 25 mg plant⁻¹ day⁻¹ on 50 DAT. The magnesium peaked at 6.6 mg plant⁻¹ day⁻¹ at 44 DAT, and the sulfur had the lowest peak at 3.0 mg plant⁻¹ day⁻¹ at 36 DAT (Figure 9C).

In the reproductive structures (Figure 9D), the maximum daily accumulation rate occurred between 69 and 87 DAT for most of the nutrients. The peak values were 18.1, 4.1, and 13.2 plant⁻¹ day⁻¹ for the nitrogen, the phosphorus, and the calcium, respectively, at 77 DAT; 3.2 mg plant⁻¹ day⁻¹ for the magnesium at 83 DAT; and 2.6 mg plant⁻¹ day⁻¹ for the sulfur at 79 DAT. For the potassium, the demand remained continuous throughout the cycle, with the maximum value of 35.8 mg plant⁻¹ day⁻¹ reached at 97 DAT.

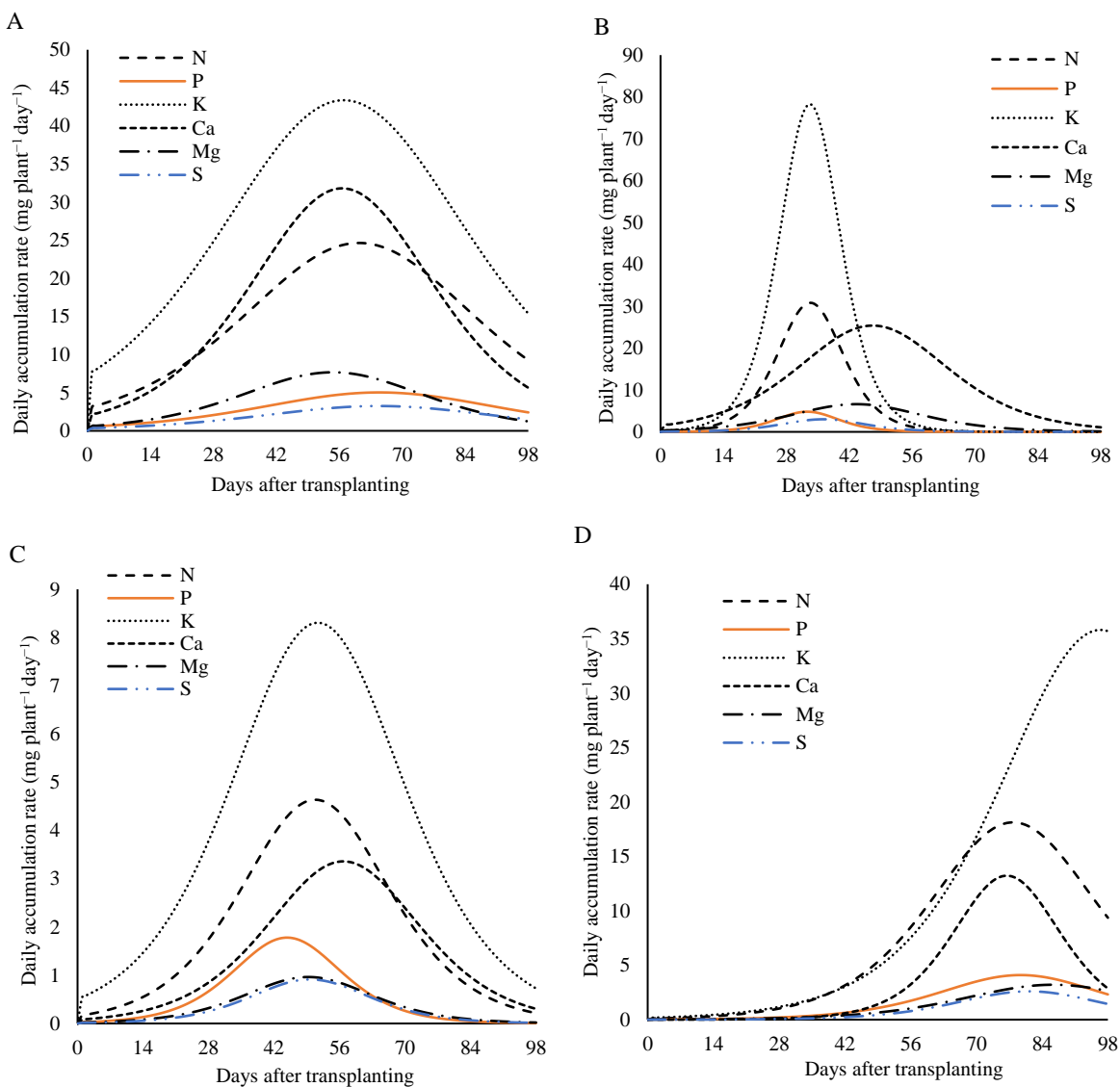


Figure 9. The daily accumulation rate of the macronutrients in the whole plant (A), the stem (B), the leaves (C), and the reproductive structure (D) of the lettuce plants fertilized with 800 kg ha⁻¹ of P₂O₅, according to the days after the transplanting.

Analyzing the nutritional demand of the plants according to the days after the transplanting at the dose of 320 kg ha⁻¹ of P₂O₅ (Figure 10), a

similar pattern was observed for all the plant parts (the leaves, the stem, the reproductive part, and the total) for almost all the nutrients. On the other hand, for the reproductive part, the daily accumulation rate of the calcium showed a continuous increase, with the peak occurring close to the harvest (Figure 10A).

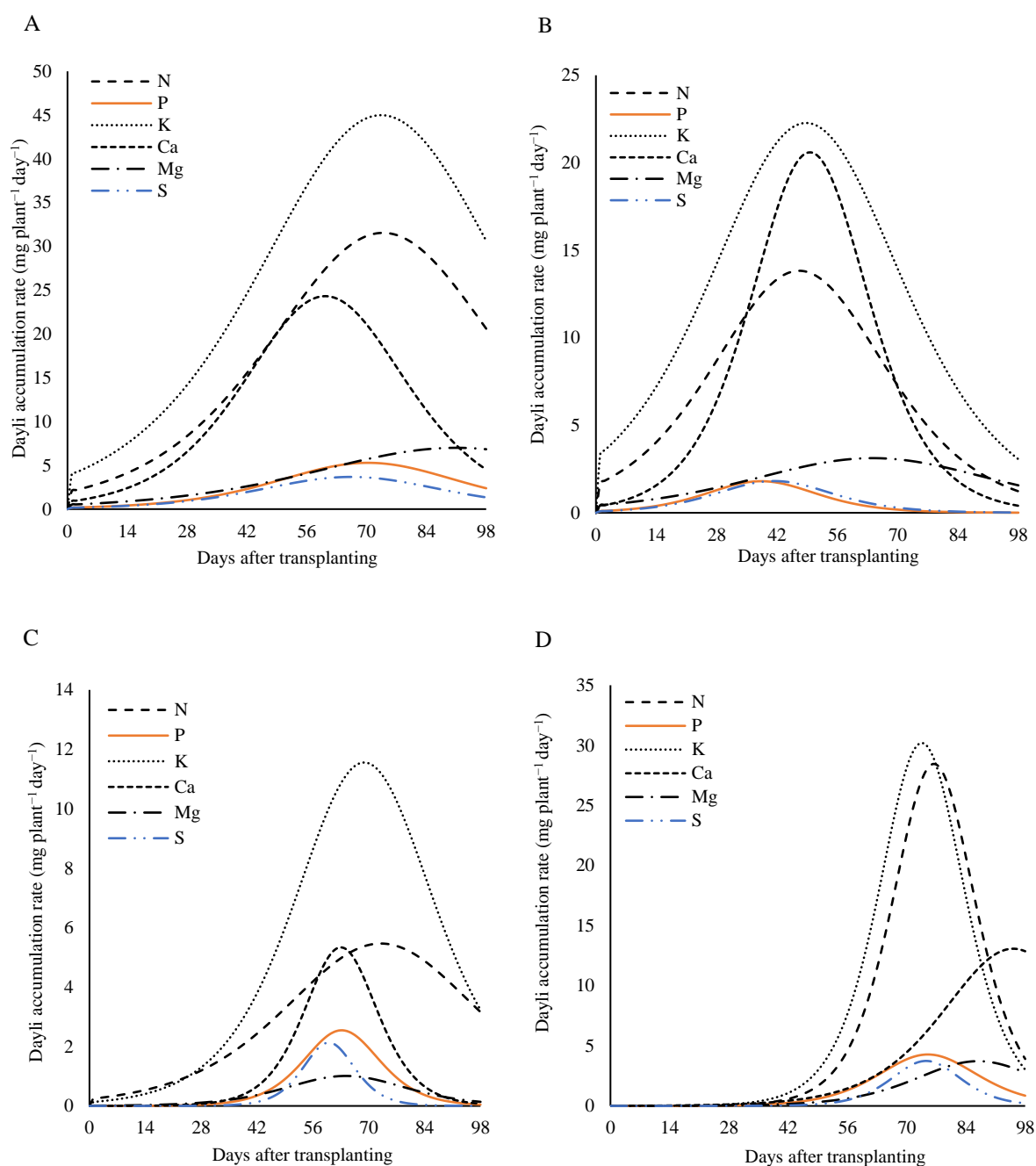


Figure 10. Daily accumulation rate of macronutrients in whole plant (A), leaves (B), stem (C), and reproductive part (D) of lettuce plants fertilized with 320 kg ha^{-1} of P_2O_5 , according to the days after the transplanting.

In the stem, the maximum rate occurred between 61 and 75 DAT, with peaks of $5.5 \text{ mg plant}^{-1} \text{ day}^{-1}$ at 72 DAT for the nitrogen, 2.5, 5.2, 1.0, and $2.1 \text{ mg plant}^{-1} \text{ day}^{-1}$ at 61 DAT for the phosphorus, the calcium, the

magnesium, and the sulfur, respectively. For the potassium, the maximum rate was $11.5 \text{ mg plant}^{-1} \text{ day}^{-1}$ at 67 DAT (Figure 10B).

The maximum daily accumulation rate in the leaves occurred between 38 and 59 DAT. For the nitrogen, the potassium, and the calcium, the maximum values of 13.8, 22.7, and $20.6 \text{ mg plant}^{-1} \text{ day}^{-1}$ were recorded at 49 DAT. The phosphorus and the sulfur reached a rate of $1.8 \text{ mg plant}^{-1} \text{ day}^{-1}$ at 38 DAT, while the magnesium, the slowest nutrient, reached a rate of $3.1 \text{ mg plant}^{-1} \text{ day}^{-1}$ at 59 DAT (Figure 10C).

In the reproductive part, the demand for nutrients was the highest between 74 and 95 DAT. For the nitrogen and the phosphorus, the maximum rate was 28.4 and $4.3 \text{ mg plant}^{-1} \text{ day}^{-1}$ at 76 DAT, the potassium and the sulfur reached 30.2 and $3.7 \text{ mg plant}^{-1} \text{ day}^{-1}$ at 74 DAT, respectively, and the calcium reached $13.1 \text{ mg plant}^{-1} \text{ day}^{-1}$ at 95 DAT (Figure 10D).

2.4. Discussion

Nascimento [4], studying seed production in different lettuce genotypes, observed that the developmental stages after sowing occurred, on average, at 85 days for the bolting, 93 days for the flowering, 103 days for the anthesis, 120 days for the seed formation, and 127 days for the harvest, values quite similar to those observed in this study that were 84 DAS, 98 DAS, 112 DAS, 120 DAS, and 126 DAS, respectively. Therefore, each stage of the observed cycle was similar to those reported by these authors and confirms that for the seed production the cycle is much longer than for the lettuce production for fresh consumption.

There are cultivars with different temperature and photoperiod requirements for flowering and, therefore, they can have different cycles. This is the reason it is so important to describe when the plants have reached certain stages of the cycle, so that we can compare with the other authors and help with the fertilization and management recommendations based on the phenological stages of the plant, not just the chronological ones.

Phosphorus plays a fundamental role in the early stages of crop development, being essential for the establishment and the vigorous growth of the plants. This macronutrient participates in several vital physiological processes, such as the energy transfer through ATP, the cell division and the synthesis of nucleic acids, components essential for the formation of the plant's tissues. Its adequate availability in the early stages of the cycle directly influences the vigor of the seedlings, the development of the root system and, consequently, the productive potential of the crop throughout its development [12].

As organic sources were used, the release of the nutrients is slower compared to inorganic sources [5]. Therefore, with the lowest dose (320 kg ha^{-1} of P_2O_5), the availability of the phosphorus at the start of the cycle may have been compromised and, consequently, there was a greater difference in the plant development between the doses at this early stage. With the highest dose, even with the slower release, the need for the phosphorus at the start of the cycle must have been satisfied.

Regarding the number of leaves per plant, the values observed in this study were higher than those reported by Gasti Filho [13] for the curly lettuce cultivar Simpson, which had an average of 23 leaves per plant. Similarly, the stem diameter showed a more pronounced growth between 42 and 70 days after the transplanting (DAT), tending to stabilize toward the end of the cycle (Figure 1E,F). These results also exceeded those reported by Kano [14] who, when working with the Verônica cultivar under a planting dose of 800 kg ha⁻¹ of P₂O₅, found an average of 62 leaves and a height of 99.1 cm.

For these vegetative traits, the lettuce plants clearly exhibited the three growth phases described by Di Crescenzo [15]; an initial slow-growth phase, followed by an exponential growth phase, and concluding with a stabilization phase.

Regarding the dry matter accumulation, at the highest dose, the initial accumulation was more intense, reaching 10.8% of the total accumulated by the end of the cycle. This result indicates that applying higher amounts of phosphorus for seed production also significantly benefits the vegetative growth of the lettuce plants, as reported by Kano [14]. This effect can be explained by the improved phosphorus availability in the soil: initially classified as low (13 mg dm⁻³), the content increased to a medium level (48 mg dm⁻³) with the lower dose and to a very high level (157 mg dm⁻³) with the highest dose by the end of the cycle. Phosphorus is an essential nutrient in the formation of nucleic acids and phospholipids, and it also plays a key role in regulating fundamental physiological processes such as photosynthesis, respiration, and root system development [16], especially during the early stages of the plant cycle.

However, despite the importance of the phosphorus in the early phase, it was observed that the dry matter accumulation between 0 and 28 DAT represented only 4.8 to 10.8% of the total dry matter at the end of the cycle. This indicates that, for lettuce intended for seed production, it is not feasible to extrapolate biomass accumulation data based solely on studies that consider only the vegetative phase. After this initial period, the accumulation of dry matter becomes more intense, thereby increasing the nutrient demand as well [2].

Plant biomass growth is influenced by a number of specific factors, processes, and relationships [17] and generally follows three distinct phases: an initial slow-growth phase, followed by an exponential growth phase, and ending with a stabilization phase, in which the growth rate slows down [15]. In the present study, although the total biomass accumulation of the plant did not show a clearly defined stabilization phase (Figure 2), these three phases were clearly observed for the leaves and the stems. For the reproductive part, which began developing at 56 DAT, the growth was continuous until the end of the cycle, which explains the near absence of stabilization in the overall accumulation.

Supporting these findings, Tamellini [5], when evaluating different organic phosphorus sources and doses in lettuce production, observed an increase in the dry mass as the phosphorus dose increased, with an average value of 13.3 g per plant at a dose of 800 kg ha⁻¹ of P₂O₅ using the

cultivar Scarlet. Similarly, Kano [14] also observed increased biomass accumulation in the Verônica cultivar, obtaining 11.0 g per plant with the same dose. Therefore, the values obtained in this study with the cultivar Solaris, especially at the highest dose, were considerably higher than those reported in the literature, reinforcing both the potential of this cultivar and the benefits of phosphate fertilization for seed production.

Kano [2], while studying the nutrient accumulation in the lettuce grown for seed production, also observed a sigmoidal curve, with a low nutritional demand at the beginning of the cycle, a sharp increase after the onset of bolting, and a decrease during the final stage of development.

In this present study, by the end of the cycle, the reproductive part of the plant had accumulated 47.6% of the total nitrogen at the highest P_2O_5 dose and 41% at the lowest dose. These findings are consistent with those reported by Kano [2], who attributed this pattern to leaf senescence and the subsequent redistribution of nitrogen to the reproductive organs. Nitrogen is highly mobile within the plant, being transported through the phloem from older tissues to younger ones, or toward fruits and seeds [18].

The high phosphorus accumulation in the reproductive structures, to the detriment of vegetative tissues, was also observed in this study and can be explained by the high demand for this nutrient by seeds, as reported by Kano [2]. Phosphorus tends to accumulate in seeds to a greater extent than in any other plant part, which is favored by its high mobility and the ability to be redistributed from vegetative to reproductive tissues [10,14].

Additionally, phosphorus is an essential component of nucleic acids and phospholipids and is directly involved in regulating key physiological processes such as photosynthesis and respiration. Its role in energy metabolism is emphasized by its presence in molecules such as ATP, ADP, AMP, GTP, UTP, CTP, and pyrophosphate [18]. Therefore, an adequate phosphorus supply from the early stages of vegetative development is crucial for the formation and the full development of the reproductive structures [16,18].

Among the macronutrients evaluated, the potassium showed the highest accumulation throughout the cycle, reaching 2922.6 mg plant⁻¹ at the 800 kg ha⁻¹ P_2O_5 dose, with 49% in the leaves, 14% in the stem, and 37% in the reproductive part. At the 320 kg ha⁻¹ dose, the accumulation reached 2575.2 mg plant⁻¹, with 50% in the leaves, 19% in the stem, and 31% in the reproductive structures. Despite being a highly mobile element in the plants [16], the potassium did not predominantly accumulate in the reproductive part, indicating its greater functional importance in the leaves and the other vegetative tissues.

Potassium is essential for plant development, even though it does not form part of the plant structures. Its importance lies in osmotic regulation, stomatal opening control, enzyme activation, protein synthesis, carbohydrate transport, and various other vital functions [18].

As for calcium, its low accumulation in the reproductive organs can be explained by its poor mobility within the plant [16,19]. Therefore, it is essential that calcium be available in the soil throughout the entire growth cycle, especially during the reproductive stage, along with adequate

irrigation and a favorable cation balance to facilitate uptake [20]. The calcium absorption occurs predominantly through the xylem, driven by water flow and transpiration, which reinforces its limitation in being redistributed to other plant parts. Nevertheless, calcium is vital for the integrity of the cell membranes and the cell walls, acting in the formation of calcium pectates in the middle lamella and in the regulation of ion transport and exchange [21].

Regarding magnesium, its higher accumulation in leaves compared to reproductive organs can be attributed to its close association with the chlorophyll molecule, making it essential for the photosynthetic process [22].

Finally, sulfur—essential for the formation of amino acids and proteins—also displayed a pattern similar to nitrogen, with a greater accumulation starting in the reproductive stage, particularly in seed-producing organs. This nutrient is also important for photosynthesis and is associated with cold resistance [18], reinforcing its relevance throughout all the stages of the plant development.

The accumulation of the nutrients does not show a single pattern in the plant, just as the vegetative and reproductive parts show differences in the accumulation of the nutrients. As discussed, some nutrients accumulate preferentially in the leaves, such as calcium, which is not very mobile in the plant and does not translocate to the reproductive parts [20]. Magnesium is also not very mobile in the plant and is essential in the formation of chlorophyll, concentrated mainly in the leaves [22]. On the other hand, phosphorus is one of the most important nutrients in seed formation [2,16], where it is stored in the form of phytin as a source of energy during the germination process. Nitrogen, as well as being a mobile element in the plant, is fundamental in the formation of amino acids and is accumulated in seeds, which are rich in proteins. As seed development takes place in the second half of the plant's cycle, this is the stage of the greatest nutrient demand, and the seeds accumulate dry matter (nutrients) increasingly until the end of the cycle. This differential distribution of nutrients is influenced by environmental factors, such as temperature and the availability of nutrients in the soil, which modulate the absorption and allocation of essential elements in plants [23].

According to Bezerra [19], shortly before the emergence of flower buds—around the formation of the reproductive organs—there is a peak demand for macronutrients to support the development of vegetative parts. Proper vegetative development is essential to meet the plant's needs during the reproductive phase, which includes the seed formation and maturation. Following this peak in daily nutrient accumulation, there is a significant decrease in the uptake rate, along with the stabilization of dry mass in the vegetative parts. On the other hand, after flowering, a noticeable accumulation of dry matter begins in the reproductive parts and continues until the seed maturation is complete.

This pattern was also confirmed in this present study, with the highest nutrient demand observed in the vegetative parts before 56 DAT, while the peak nutrient demand in the reproductive parts occurred after this period. These findings highlight the importance of nutrient

availability throughout the entire production cycle, which, in the case of lettuce seed production, extended up to 98 DAT. In this context, it is advantageous to grow crops in soils rich in organic matter, complemented by slow-release organic fertilizers, to ensure adequate plant nutrition throughout the cycle [4,5].

It is important to note that the results obtained refer to a single cultivar, in a single location, and therefore cannot be freely extrapolated to any other condition. However, it is worth noting that this is the first study reported with the aim of obtaining a nutrient accumulation curve in an organic lettuce seed production field. Therefore, for the extrapolation and validation of these results, complementary studies in different environments, cultivation systems, and with different genotypes are recommended, to ensure greater robustness and applicability of the results.

2.5. Conclusions

Considering the management and the environmental conditions of this research, it is possible to conclude:

The vegetative part of the lettuce plant grown for seed production under organic cultivation shows slow initial growth, followed by acceleration up to the beginning of flowering (70 DAT), and stabilization after this period.

The reproductive part of the lettuce plant begins to grow from 56 DAT, increasing the daily nutrient demand until the end of the seed maturation and the harvest at 98 DAT (112 DAS).

The descending order of nutrient accumulation in the plant, at the doses of 800 and 320 kg ha⁻¹, was: K (2922.6) > Ca (1658.8) > N (1527.7) > Mg (416.0) > P (308.1) > S (197.6), and K (2574.2) > N (1743.2) > Ca (1210.2) > Mg (358.8) > P (256.8) > S (185.5), respectively.

The highest nutrient demand in the plant occurred between 55 and 88 DAT.

Author Contributions: Conceptualization, J.M.d.S. and A.I.I.C.; methodology, J.M.d.S., D.S.S., J.d.Á., J.R.d.C., and E.P.d.S.; software, J.M.d.S. and A.I.I.C.; validation, J.M.d.S. and A.I.I.C.; formal analysis, J.M.d.S. and E.P.d.S.; investigation, J.M.d.S., D.S.S., J.d.Á., J.R.d.C., and E.P.d.S.; resources, J.M.d.S. and A.I.I.C.; data curation, J.M.d.S. and E.P.d.S.; writing—original draft preparation, J.M.d.S.; writing—review and editing, J.M.d.S., A.I.I.C., and P.G.N.-F.; visualization, A.I.I.C. and P.G.N.-F.; supervision, J.M.d.S. and A.I.I.C.; project administration, A.I.I.C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received funding from the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq; process 310652/2022-7)

Data Availability Statement: The data will not yet be shared because it has not yet been published, for security reasons and for the protection of research data.

Conflicts of Interest: Daniel Seiji Seguchi was employed by the company (Empresa: Agristar Ltda.). The remaining authors declare that the research was

conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

References

1. Alves, A.U.; Prado, R.M.; Correia, M.A.R.; Gondim, A.R.O.; Cecílio Filho, A.B.; Politi, L.S. Cauliflower grown in substrate: Absorption rate of macronutrients and micronutrients. *Ciênc. Agrotec.* **2011**, *35*, 45–55.
2. Kano, C.; Cardoso, A.I.I.; Villas Bôas, R.L. Nutrient accumulation by lettuce for seed production. *Hortic. Bras.* **2011**, *29*, 70–77.
3. Lima, S.K.; Galiza, M.; Valadares, A.; Alves, F. *Production and Consumption of Organic Products in the World and in Brazil: Text for Discussion*; Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada: Brasília, Brazil, 2020; 52p.
4. Nascimento, W.M.; Vidal, M.C.; Resende, F.V. *Vegetable Seed Production in Organic Systems*; Embrapa Hortaliças: Brasília, Brazil, 2012.
5. Tamelini, B.R.; Souza, E.P.D.; Alves, T.N.; Cardoso, A.I.I. Sources and doses of phosphorus in the production of red-leaf lettuce in an organic farming system. *Braz. Arch. Biol. Technol.* **2024**, *67*, e24230761.
6. Franco, J.R.; Dal Pai, E.; Calça, M.V.C.; Raniero, M.R.; Dal Pai, A.; Sarnighausen, V.C.R.; Román, R.M.S. Atualização da normal climatológica e classificação climática de Köppen para o município de Botucatu-SP. *Irriga* **2023**, *28*, 77–92.
7. Trani, P.E.; Raij, B.V.; Cantarella, H.; Figueiredo, G.J.B. Vegetables. In *Fertilization and Liming Recommendations for the State of São Paulo*; Cantarella, H., Quaggio, J.A., Mattos, D., Jr.; Boaretto, R.M., van Raij, B., Eds.; IAC: Campinas, Brazil, 2022; pp. 339–424.
8. Kano, C.; Cardoso, A.I.I.; Bôas, R.L.V. Phosphorus doses on lettuce seed production and quality. *Hortic. Bras.* **2012**, *30*, 695–698.
9. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). *Manual of Official Analytical Methods for Fertilizers and Correctives*; MAPA: Brasília, Brazil, 2017; 240p.
10. Marouelli, W.A. Irrigation in vegetable seed production fields. In *Vegetables: Seed Production Technology*; Nascimento, W.M., Ed.; Embrapa Hortaliças: Brasília, Brazil, 2011; pp. 137–154.
11. Malavolta, E.; Vitti, G.C.; Oliveira, S.A. Principles, methods and techniques for assessing nutritional status. In *Assessment of Plant Nutritional Status: Principles and Applications*, 2nd ed.; Malavolta, E., Vitti, G.C., Oliveira, S.A., Eds.; Potafós: Piracicaba, Brazil, 1997; pp. 115–230.
12. Grant, C.A.; Flaten, D.N.; Tomasiewicz, D.J.; Sheppard, S.C. The importance of early season phosphorus nutrition. *Can. J. Plant Sci.* **2001**, *81*, 211–224.
13. Gasti Filho, J.; Resende, M.A.; Ferreira, I.; Martins, I.S.; Piva, H.T. Agronomic performance of organic lettuce as a function of soil cover. *Agroecosistemas* **2020**, *12*, 51–68.
14. Kano, C. Phosphorus Doses on Nutrient Accumulation, Production and Quality of Lettuce Seeds. Ph.D. Thesis, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho: Botucatu, Brazil, 2006.
15. Di Crescenzo, A.; Paraggio, P.; Román-Román, P.; Torres-Ruiz, F. Applications of the multi-sigmoidal deterministic and stochastic logistic models for plant dynamics. *Appl. Math. Model.* **2021**, *92*, 884–904.
16. Malavolta, E. *Manual of Plant Mineral Nutrition*; Agronômica Ceres: São Paulo, Brazil, 2006.
17. Cao, L.; Shi, P.J.; Li, L.; Chen, G. A new flexible sigmoidal growth model. *Symmetry* **2019**, *11*, 204.
18. Taiz, L.; Zeiger, E.; Moller, I.M.; Murphy, A. *Physiology and Plant Development*; Artmed: Porto Alegre, Brazil, 2017; 858p.
19. Bezerra, S.R.B.; Marques, I.B.; Bardivieso, E.M.; Pelvine, R.A.; Aguilar, A.S.; Cardoso, A.I.I. Application of calcium and boron directed to inflorescences in production, quality and nutrient accumulation in lettuce seeds. *Hortic. Bras.* **2023**, *41*, e2427.
20. Gilliam, M.; Dayod, M.; Hocking, B.J.; Xu, B.; Conn, S.J.; Kaiser, B.N. Calcium delivery and storage in plant leaves: Exploring the link with water flow. *J. Exp. Bot.* **2011**, *62*, 2233–2250.
21. Hadi, M.R.; Karimi, N. The role of calcium in plants' salt tolerance. *J. Plant Nutr.* **2012**, *35*, 2037–2054.

22. Castro, C.; Oliveira Júnior, A.; Oliveira, F.A.; Firmano, R.F.; Zancanaro, L.; Klepker, D.; Foloni, J.S.S.; Brighenti, A.M.; Benites, V.d.M. *Magnesium: Management for the Nutritional Balance of Soybeans*; Embrapa: Londrina, Brazil, 2020; 54p.
23. Li, L.; Chen, D.; Huang, X.; Zhang, W.; Yang, Y.; Fang, J. Variations of nitrogen and phosphorus between leaf, stem and root in shrubland biomes and responses to climate and soil factors across the Hengduan Mountains, China. *Catena* **2024**, *229*, 108008.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

CAPÍTULO 3

ACÚMULO DE MATÉRIA SECA E DE MACRONUTRIENTES EM ALFACE PARA A PRODUÇÃO DE SEMENTES EM FUNÇÃO DE DOSES DE FÓSFORO

RESUMO

As informações sobre o acúmulo de nutrientes, especialmente em relação à adubação fosfatada, na alface destinada à produção de sementes ainda são poucas na literatura e representa um problema significativo na área de nutrição de plantas. Assim, pode-se estar comprometendo a capacidade de otimizar a produtividade e qualidade das sementes, evidenciando a necessidade de estudos específicos para fundamentar o manejo adequado desse nutriente no cultivo de alface para sementes. Diante disso, objetivou-se estudar a curva de acúmulo de matéria seca e de macronutrientes em plantas de alface para produção de sementes, utilizando duas doses de fósforo. O experimento foi realizado na Fazenda Experimental da Universidade Estadual Paulista (UNESP), em São Manuel, SP, sob condições de ambiente protegido. Foram testadas duas doses de fósforo (800 e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅) fornecidas como superfosfato triplo. As plantas de alface crespa, cultivar Solaris, foram coletadas em oito momentos (0, 14, 28, 42, 56, 70, 84 e 98 dias após o transplântio - DAT) para análise de altura, diâmetro do caule, número de folhas, determinação da matéria seca e análise de macronutrientes na matéria seca em cada órgão (vegetativo (folhas e caule) e reprodutivo) e o total na planta. Os dados se ajustaram ao modelo sigmoidal de regressão não linear, com três parâmetros. O cultivo de alface para produção de sementes requer maior tempo e manejo nutricional específico, com maior demanda de nutrientes nas fases de crescimento ativo (40 a 70 DAT) e maturação (80 a 90 DAT). O potássio e o nitrogênio, nessa ordem, destacam-se como os elementos mais exigidos ao longo do ciclo de alface para a produção de sementes, independente da dose de P₂O₅.

Palavras-chave: *Lactuca sativa*; manejo nutricional; adubação fosfatada; superfosfato.

ABSTRACT

Information on nutrient accumulation, especially regarding phosphorus fertilization, in lettuce grown for seed production is still scarce in the literature and represents a significant issue in plant nutrition. This lack of information can compromise the ability to optimize seed yield and quality, highlighting the need for specific studies to support proper management of this nutrient in lettuce seed production. Therefore, this study aimed to evaluate the dry matter and macronutrient accumulation curve in lettuce plants for seed production using two phosphorus rates. The experiment was conducted at the Experimental Farm of São Paulo State University (UNESP), in São Manuel, SP, under protected environment conditions. Two phosphorus rates (800 and 320 kg ha⁻¹ of P₂O₅) were tested, supplied as triple superphosphate. Crisphead lettuce plants, cultivar Solaris, were sampled at eight stages (0, 14, 28, 42, 56, 70, 84, and 98 days after transplanting — DAT) for measurements of plant height, stem diameter, leaf number, dry matter determination, and macronutrient analysis in each plant organ (vegetative – leaves and stem – and reproductive) and total plant content. Data were fitted to a three-parameter nonlinear sigmoid regression model. Lettuce cultivation for seed production requires longer growth periods and specific nutrient management, with higher nutrient demand during the active growth (40–70 DAT) and maturation (80–90 DAT) stages. Potassium and nitrogen, in this order, were the most demanded elements throughout the lettuce seed production cycle, regardless of the P₂O₅ rate.

Keywords: *Lactuca sativa*; nutrient management; phosphorus fertilization; superphosphate.

3.1 INTRODUÇÃO

A alface é uma das hortaliças mais consumidas no mundo, conhecida por sua versatilidade, baixo teor calórico e benefícios à saúde. O ciclo de cultivo da alface hortaliça é relativamente curto, comparado com outras olerícolas, podendo estar sujeita a desordens fisiológicas de origem nutricional dada à velocidade de crescimento e ocorrência dos processos metabólicos, bem como as altas taxas de extração e exportação de nutrientes por hectare (Filgueira, 2013). No entanto, quando se trata do cultivo da alface para a produção de sementes, o ciclo é prolongado,

provocando mudanças no comportamento de absorção e acúmulo dos nutrientes nas diferentes partes da planta. Portanto, a dose de nutrientes recomendada para a produção de alface não deve ser a mesma para a produção de sementes.

Essa alteração no ciclo de cultivo torna-se especialmente relevante, pois exige um estudo mais aprofundado sobre a demanda de nutrientes, visando promover um crescimento vigoroso e saudável que possibilite maior produtividade. Além disso, estudos apontam que plantas submetidas a uma adubação equilibrada apresentam maior capacidade de produzir sementes em quantidade e qualidade superior, devido à sua maior resistência às adversidades ao longo do período produtivo (Sá *et al.*, 2025; Bezerra, 2024; Cardoso *et al.*, 2016).

Entre os macronutrientes, o fósforo desempenha um papel essencial no desenvolvimento das plantas. Embora seja o nutriente menos acumulado em alfaces destinadas ao consumo, nas sementes ele tende a se acumular em maior quantidade, chegando a superar o potássio (Lima *et al.*, 2020; Kano *et al.*, 2011; Quadros *et al.*, 2010). No entanto, a disponibilidade de fósforo é frequentemente limitada nos solos brasileiros devido à acidez elevada, baixa fertilidade e alta capacidade de retenção, o que demanda aplicações substanciais desse nutriente para atender às necessidades das plantas (Reis, 2020).

O fósforo é indispensável para diversos processos metabólicos, como transferência de energia, fotossíntese, respiração e síntese de ácidos nucleicos. A importância de práticas agrícolas otimizadas para melhorar a eficiência da adubação fosfatada e o potencial produtivo da alface tem sido destacada por diversos estudos (Fatima *et al.*, 2018; Oliveira *et al.*, 2020; Jorgetto, 2019).

A demanda por fósforo varia ao longo do ciclo, podendo apresentar padrões distintos de absorção e acúmulo de acordo com as quantidades aplicadas de nutrientes. No entanto, há uma escassez de estudos sobre a dinâmica de absorção e acúmulo de fósforo em plantas de alface destinadas à produção de sementes.

Diante disso, o presente estudo teve como objetivo avaliar a dinâmica de acúmulo de matéria seca e de macronutrientes em plantas de alface para produção de sementes, utilizando duas doses de fósforo.

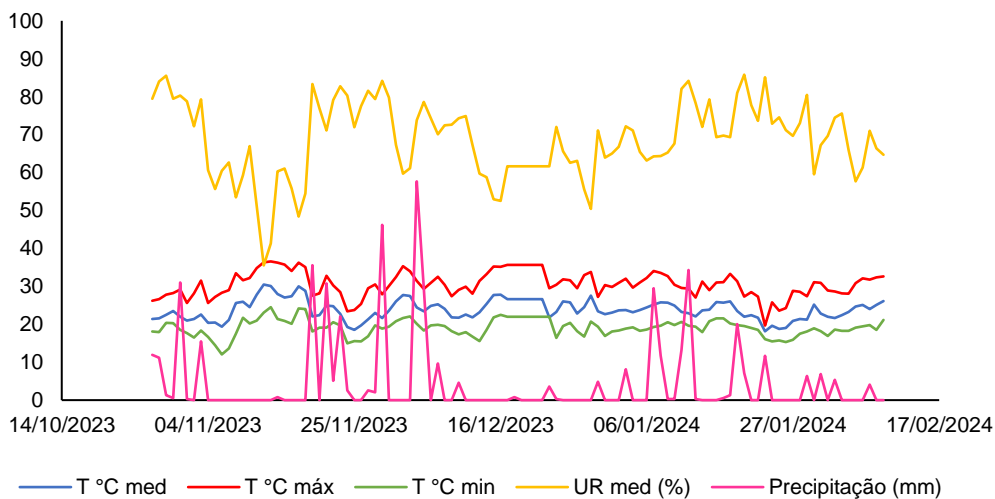
3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Localização da área experimental e tratamentos

A pesquisa foi desenvolvida na Fazenda Experimental da Universidade Estadual Paulista, localizada no município de São Manuel, São Paulo (22°46'04.9"S, 48°34'19.4"W e 709 m de altitude), no período de 29 de setembro de 2023 a 05 de fevereiro de 2024. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é tropical do tipo Aw, com verão chuvoso e inverno seco (Franco *et al.*, 2023).

O experimento foi conduzido em ambiente protegido, em estufa do tipo arco, com pé direito de 2,5 m, com 7 m de largura por 20 m de comprimento, coberta com filme de polietileno de alta densidade (150 μm) e laterais fechadas com tela antiafídica. As médias da temperatura máxima, média e mínima, a umidade relativa (UR) e a precipitação média diária para o período foram 30,3 °C, 23,7 °C, 18,9 °C, 69,1 % e 4,6 mm, respectivamente (Figura 1). Estes dados referem-se ao ambiente externo ao ambiente protegido.

Figura 1 — Dados climatológicos da Fazenda Experimental de São Manuel no período de condução do experimento. 2023- 2024



O solo utilizado foi classificado como latossolo vermelho distrófico típico arenoso (Santos *et al.*, 2013). Antes e após a condução do experimento, amostras de solo foram coletadas e enviadas para o Departamento de Ciência Florestal, Solos e Ambiente da FCA/UNESP, campus de Botucatu-SP, para a realização da análise química, fornecendo os resultados expressos na Tabela 1. A correção do solo foi realizada com base na análise do solo para elevar a saturação por bases a 80%, seguindo a recomendação de Trani *et al.* (2022).

Tabela 1— Análise do solo antes e após a condução da pesquisa

Fonte	pH _(CaCl2)	M.O.	P _{res}	H+Al	SB	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CTC	V	Cu	Fe	Mn	Zn	B
		g dm ⁻³	mg dm ⁻³				mmol _c dm ⁻³		%					mg dm ⁻³	
Antes da calagem	4,6	2	13	18	27	1,1	20	6	45	59	1,0	8	5,6	0,7	0,19
Antes do plantio	5,8	6	13	12	50	1,3	36	12	62	80	-	-	-	-	-
Após a colheita															
Dose (kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅)															
320	7,0	7,0	57	8	61	1,1	46	14	68	89	-	-	-	-	-
800	5,6	6,0	130	16	58	4,4	38	16	74	78	-	-	-	-	-

Duas doses de fósforo (800 kg ha⁻¹ e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e diferentes épocas de colheita das plantas (0, 14, 28, 42, 56, 70, 84 e 98 dias após o transplântio- DAT) foram estudadas, com três repetições e uma planta por parcela, exceto na coleta 0 (feita no dia do transplântio) que foi constituída por 120 mudas. As doses utilizadas foram definidas de acordo com o proposto por Kano *et al.* (2012) e a recomendação de adubação para a cultura da alface (Trani *et al.*, 2022), para sementes e colheita para o mercado *in natura*, respectivamente.

A adubação de plantio e de cobertura foram feitas com base na análise de solo e de acordo com as recomendações de Trani *et al.* (2022), e correspondeu ao fornecimento de 0,16 g por planta de nitrogênio (N) e 0,48 g por planta de potássio (K₂O), nas formas de ureia e cloreto de potássio, respectivamente. Foi adicionado 80 g por planta de esterco de galinha como fonte de matéria orgânica. A análise química do esterco de galinha foi feita conforme o Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos (MAPA, 2017), e apresentou os seguintes resultados: N=1,1%; P₂O₅=1,3%; K₂O=1,6%; S=0,2%; Ca=1,1% e Mg=0,5%.

A adubação fosfatada de plantio foi feita aplicando-se superfosfato triplo nas quantidades de 8,0 e 3,2 g por planta, correspondente as doses de 800 e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente. Na adubação de cobertura, N, P₂O₅ e K₂O foram fornecidos nas quantidades de 0,18, 0,06 e 0,12 g por planta, respectivamente, semanalmente, até uma semana anterior a colheita das sementes (91 DAT). Os nutrientes foram fornecidos na forma de ureia, MAP e cloreto de potássio, via fertirrigação. Na Tabela 3 tem-se a quantidade de macronutrientes potencialmente fornecidos por hectare antes do plantio, em cobertura e total nos tratamentos, considerando-se todos os adubos utilizados ao longo do ciclo. Considerando-se que o esterco de galinha tem fósforo em sua composição (1,3%), as doses aplicadas antes

do plantio foram superiores ao descrito nos tratamentos. No entanto, como não se pode ter certeza de que este fósforo estará disponível às plantas e foi igual para todas as plantas, considerou-se como tratamento as doses fornecidas com o superfosfato triplo.

Tabela 2 —Quantidade de macronutrientes potencialmente fornecidos por ha antes do plantio, em cobertura e total nos tratamentos

Tratamento	N	K ₂ O	P ₂ O ₅	Ca	Mg	S
kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅			kg ha ⁻¹			
			Antes do plantio			
320	270	434,0	580,0	228,0	94,0	40,0
800	270	434,0	1060,0	316,0	94,0	40,0
			Em cobertura			
320	630	420	210	-	-	-
800	630	420	210	-	-	-
			Total			
320	900	854,0	790,0	228,0	94,0	40,0
800	900	854,0	1270,0	316,0	94,0	40,0

A cultivar de alface utilizada foi a Solaris, tipo crespa. As mudas foram produzidas em bandejas de polipropileno de 200 células contendo substrato comercial, e foram transplantadas aos 28 dias após a semeadura (DAS), no dia 27 de outubro de 2023 em vasos com capacidade para 8L de solo. Os vasos foram dispostos a uma distância de 1,0 m entre linhas e 0,5 m entre plantas e aos 70 dias após o transplante (DAT) as plantas foram amarradas em taquaras de bambu para evitar tombamentos devido ao peso adquirido com o desenvolvimento das sementes.

A irrigação foi feita de forma localizada com uso de fitas gotejadoras, sendo o fornecimento de água parcelado em três aplicações diárias. O controle de plantas espontâneas foi feito de forma manual, e o controle químico foi feito para prevenir a pressão de pragas.

3.2.2 Características avaliadas

As plantas foram coletadas mediante corte na base do caule, rente ao solo, aferindo-se em cada coleta as medidas de altura da planta, diâmetro do caule e a contagem do número de folhas. As plantas coletadas foram separadas em parte vegetativa (folhas e caule, separadamente) e reprodutiva (a partir dos 56 DAT) e

lavadas com água corrente e água destilada. Na última coleta, aos 98 DAT, as sementes foram separadas das demais partes do material reprodutivo. A colheita das sementes foi feita quando cerca de 70% dos aquênios apresentavam cerdas (*papus*) brancas na inflorescência.

A cada coleta das folhas, caule e parte reprodutiva foram acondicionadas, separadamente, em sacos de papel Kraft e postas para secar em estufa com circulação de ar forçada a $65\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ até que alcançassem uma massa constante, e pesadas em balança de precisão de 0,01 g para obtenção da massa seca, com os dados expressos em g planta^{-1} .

As amostras secas foram moídas em moinho de aço inoxidável, tipo Willey, armazenadas em sacos de papel e encaminhadas para o laboratório de análises de plantas do Departamento de Ciência Florestal, Solos e Ambiente da FCA/UNESP para a determinação dos teores de macronutrientes nas diferentes partes da planta. A metodologia para as análises dos nutrientes foi feita de acordo com descrito em Malavolta, Vitti e Oliveira (1997), utilizando-se a digestão sulfúrica para a determinação de nitrogênio e digestão nítrico-perclórica para fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre. Os resultados foram obtidos em g kg^{-1} de matéria seca e foram utilizados no cálculo para obtenção do acúmulo de macronutrientes. As quantidades de nutrientes acumulados foram obtidas pela proporcionalidade do teor de cada nutriente pela massa da matéria seca da amostra e os dados foram expressos em mg planta^{-1} .

A taxa de acúmulo diário para as partes vegetativa, reprodutiva e total foi calculada a partir do acúmulo estimado para cada nutriente, subtraindo-se os valores de dois dias consecutivos. Esse cálculo foi realizado para todos os dias do ciclo de cultivo, resultando em valores de acúmulo diário, expressando os resultados em $\text{mg planta}^{-1}\text{ dia}^{-1}$ para cada macronutriente.

3.3.3 Análise estatística

Para estimar o crescimento e o acúmulo de macronutrientes foi feito um procedimento de ajustamento de curva de regressão não linear sigmoidal com três parâmetros, utilizando o software Origin, conforme Equação 1:

$$y = \frac{a}{1+e^{-k(x-xc)}} \quad (1)$$

Onde y é valor médio da característica avaliada, a é ponto de máximo da curva, k é o parâmetro de ajuste e $x c$ é o ponto de inflexão.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ciclo da alface crespa cv. Solaris para produção de sementes apresentou uma duração significativamente maior do que o ciclo voltado ao consumo *in natura*. Esse ciclo, do transplante até a colheita das sementes, foi de 98 DAT (ou 126 dias após a semeadura -DAS), com o crescimento ajustando-se ao modelo sigmoidal. Comparado ao ciclo da alface para consumo, que leva cerca de 35 DAT, ou 63 DAS, o período para produção de sementes é cerca de 2,5 vezes mais longo. O desenvolvimento das estruturas reprodutivas seguiu uma sequência marcada por eventos específicos: a emissão dos primeiros botões florais ocorreu aos 56 DAT (84 DAS), o florescimento teve início aos 70 DAT (98 DAS) e a abertura das flores se deu em torno dos 84 DAT (112 DAS).

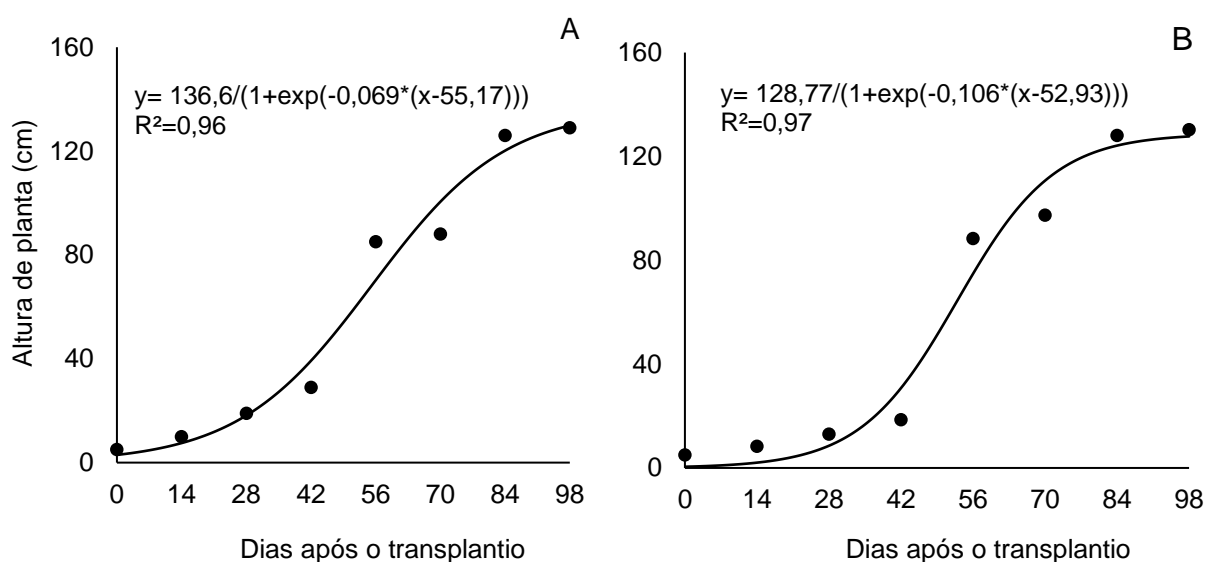
3.3.1 Altura de plantas

Os tratamentos apresentaram a mesma tendência quanto à altura das plantas ao longo das épocas avaliadas, ajustando-se a função sigmoidal (Figura 2). O maior incremento da altura das plantas ocorreu a partir do início do pendoamento (42 DAT), fase em que há alongamento da haste floral. No ponto comercial (35 DAT), os valores de altura das plantas foram de 27,2 e 16,7 cm com 800 e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅ respectivamente, com uma média de 21,9 cm. Cruz (2019), estudando o acúmulo de nutrientes em duas variedades de alface, observaram uma altura de 25 e 22 cm com as cultivares Valentina e Isadora, respectivamente.

Os valores de altura obtidos nesse experimento ao final do ciclo foram de 129,8 cm (800 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e 127,7 cm (320 kg ha⁻¹ de P₂O₅), valores próximos à máxima altura (100 cm) obtida por Reghin *et al.* (2000) para a cultivar Verônica e por Izzeldin *et al.* (1980), que obtiveram uma altura média de 120 cm. Já Cardoso (2005) obteve

uma média de 82 cm em experimento com alface ‘Verônica’, com cultivo em época de fotoperíodo decrescente (fevereiro a agosto de 2004). Sabe-se que tanto a temperatura quanto o fotoperíodo exercem papel determinante no alongamento da haste floral em alface, e estudos mais recentes indicam que o pendoamento é também regulado em nível molecular, envolvendo vias associadas ao fotoperíodo, à idade da planta e ao ácido giberélico, as quais são ativadas sob altas temperaturas, resultando em florescimento precoce (Hiraoka, 1967 e 1969; Ryder, 1999; Hao *et al.*, 2022; Jeong *et al.*, 2024).

Figura 2- Altura de plantas de alface para a produção de sementes nas doses de 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (A) e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (B)

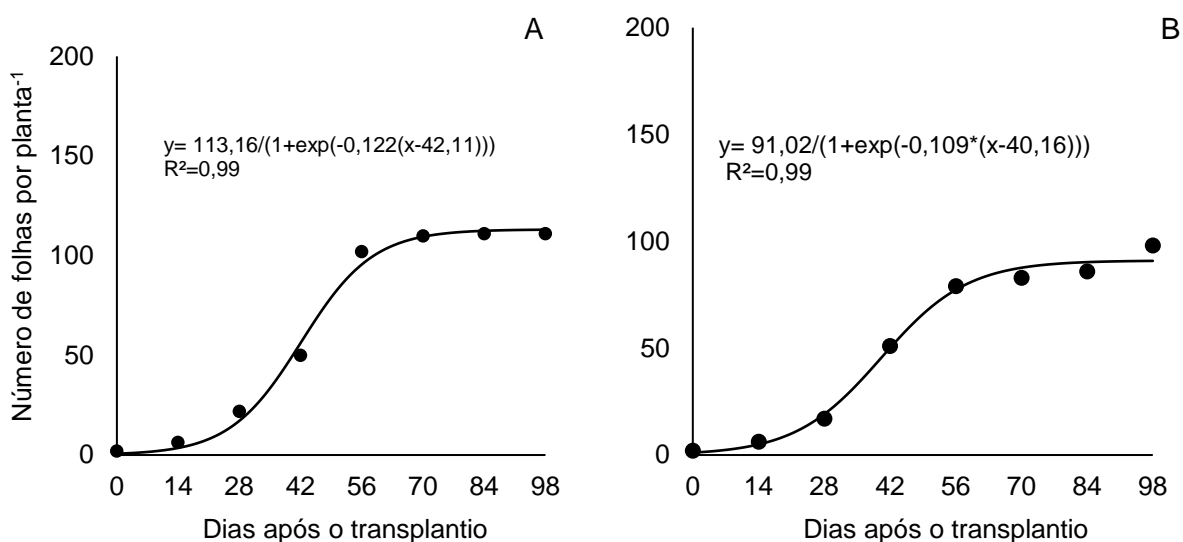


3.3. 2 Número de folhas

O número de folhas por planta apresentou a mesma tendência para as duas doses de fósforo (800 e 320 kg ha⁻¹) durante as épocas avaliadas, ajustando-se a função sigmoidal (Figura 3). Observou-se maior aumento dos 28 aos 70 DAT, e depois do início do florescimento praticamente não foi alterado (Figura 3). No ponto comercial (35 DAT), o número de folhas por planta foi de 33 e 28 folhas nas doses de 800 e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅ respectivamente, com uma média de 30 folhas por planta.

No final do ciclo (98 DAT), as plantas estavam com 113 (800 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e 98 (320 kg ha⁻¹ de P₂O₅) folhas por planta, com uma média de 101 folhas por planta, valor superior ao obtido por Kano (2006) e Cardoso (2005), que obtiveram média de 55 e 43 folhas por planta, respectivamente, para a cultivar Verônica.

Figura 3- Número de folhas por planta de alface para a produção de sementes nas doses de 800 (A) e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (B)



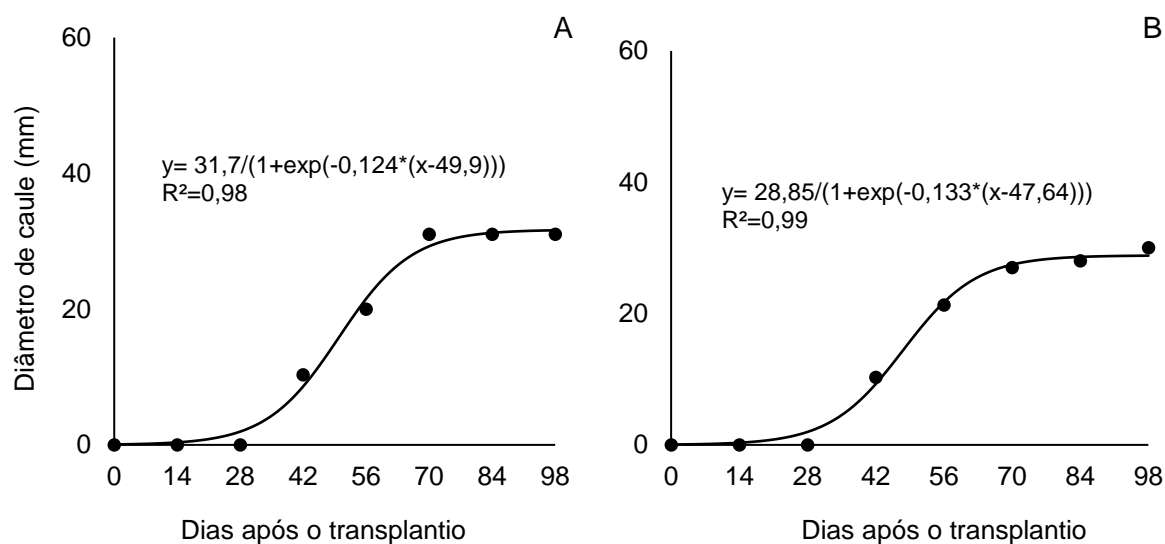
3.3.3 Diâmetro de caule

O diâmetro do caule mostrou crescimento mais acentuado entre 42 e 70 DAT, estabilizando-se após esse período até o final do ciclo (Figura 4A, 4B). A partir dos 70 DAT, a parte reprodutiva da planta entrou em pleno desenvolvimento, com intenso acúmulo de massa seca (Figura 5). Em contraste, a parte vegetativa estabilizou o crescimento, e, embora mantivesse um desenvolvimento contínuo, a mobilização de reservas passou a se concentrar predominantemente na parte reprodutiva.

A medida de diâmetro de caule não tem sido avaliada nos estudos com a produção de sementes de alface. Porém, essa medida pode ajudar a auxiliar na diferenciação das fases de crescimento da alface, já que o pendoamento (mudança da fase vegetativa para a reprodutiva) ocorre em decorrência da alongação e aumento do diâmetro do caule. De acordo com Feng *et al.* (2019) um caule bem desenvolvido

permite uma mobilização mais eficaz de reservas para a parte reprodutiva e reduz a chance de acamamento das plantas.

Figura 4- Diâmetro de caule de plantas de alface para a produção de sementes nas doses de 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (A) e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (B)

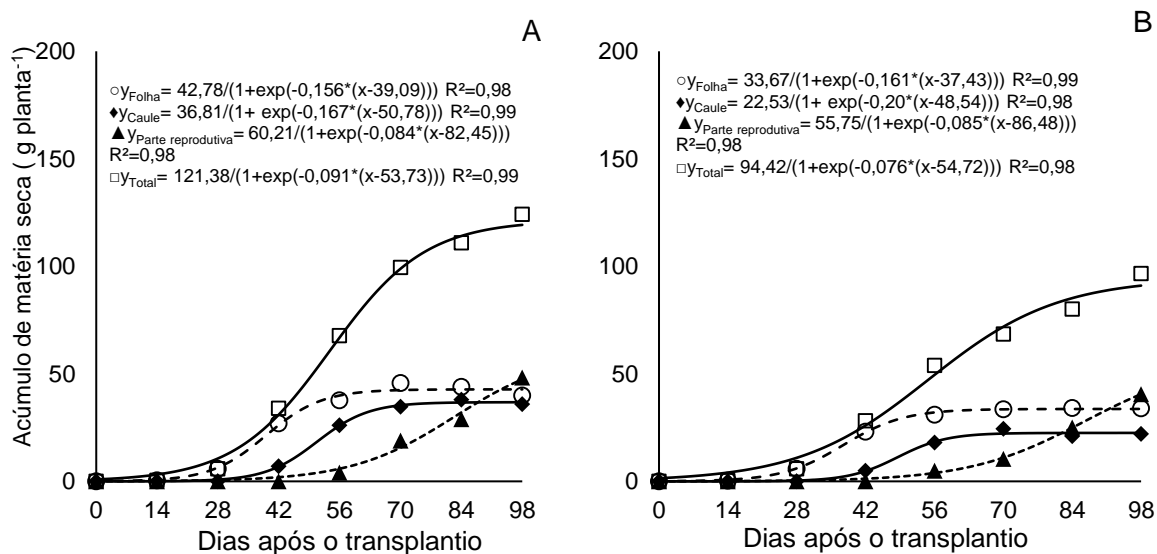


3.3.4 Acúmulo de matéria seca

A massa seca da parte aérea total das plantas seguiu a mesma tendência nas duas doses, ajustando-se a função sigmoidal e foi crescente ao longo das épocas avaliadas (Figura 5), podendo ser dividida em dois períodos: de 0 a 28 DAT e de 29 a 98 DAT. No primeiro estágio, a massa seca da parte aérea total das plantas foi de 7,9 g planta⁻¹ (800 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e 6,8 g planta⁻¹ (320 kg ha⁻¹ de P₂O₅).

Dos 29 aos 98 DAT, a planta acumulou, em média, 93,3% do total de massa seca acumulada ao final do ciclo. Na época da colheita das sementes, a planta estava com 126,9 e 96,7 g planta⁻¹ de matéria seca, nas doses de 800 e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente, média de 108,8 g planta⁻¹. Kano et al. (2011) e Cardoso (2005) obtiveram uma massa seca da parte aérea total de 73,0 e 75,5 g planta⁻¹ para a cultivar Verônica, respectivamente.

Figura 5- Acúmulo de matéria seca nas folhas, caule, parte reprodutiva e total de plantas de alface nas doses de 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (A) e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (B)



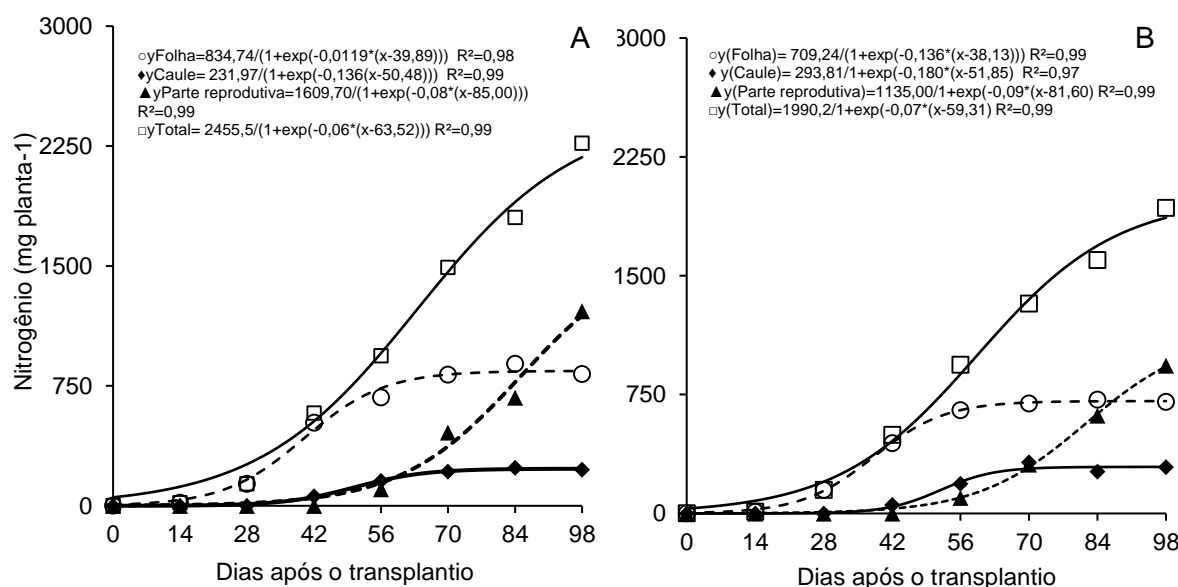
No ponto de colheita para o consumo *in natura*, ou seja, aos 35 DAT, a planta acumulou 15,7 e 18,7 g planta⁻¹ de matéria seca, o que correspondeu a 14,9% e 16,0% do acúmulo total de matéria seca, na dose de 800 e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente. Estes valores são superiores ao obtido por Lobo *et al.* (2020) que, ao avaliarem aplicação de nitrogênio oriundo de fonte orgânica e convencional na alface cultivar Lucy Brown em dois ciclos de cultivo, obtiveram a máxima produção de massa seca de 6,3 g e 3,0 planta⁻¹ com a fonte convencional. Cruz (2019), ao avaliar o acúmulo de nutrientes em variedades de alface, obteve acúmulos de 53,3 e 35,2 g planta⁻¹, com a cultivar Valentina e Isadora, respectivamente. Kano *et al.* (2012), avaliando o acúmulo e a resposta da alface a adubação fosfatada, obtiveram massa seca de 11,0 g planta⁻¹ com a dose de 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅ com a cultivar Verônica.

3.3.5 Acúmulo de macronutrientes

Para as duas doses de fósforo estudadas, o acúmulo de nitrogênio nas folhas foi mais intenso nos primeiros 56 DAT (84 dias após a semeadura), com tendência à estabilização após esse período. O caule apresentou um acúmulo mais gradual em relação às folhas, mas com aumento mais acentuado a partir de 42 DAT, tendendo a estabilizar a partir dos 70 DAT. Na parte reprodutiva, o acúmulo de nitrogênio foi mais significativo a partir dos 70 DAT, por ocasião do florescimento (Figura 6A,6B).

A partir dos 70 DAT o acúmulo de nitrogênio na parte vegetativa diminuiu significativamente, tendendo a uma estabilização até o final do ciclo. De acordo com Bezerra (2024), esse comportamento indica que esses órgãos passaram a redistribuir o nitrogênio para as estruturas reprodutivas na mesma proporção em que recebem o nutriente absorvido pela planta.

Figura 6- Acúmulo de nitrogênio nas diferentes partes das plantas de alface destinadas à produção de sementes nas doses de 800 (A) e 320 (B) kg ha⁻¹ de P₂O₅



Estudos reforçam a importância do nitrogênio na nutrição e desenvolvimento das plantas, especialmente no que diz respeito à translocação do nutriente para órgãos específicos durante fases críticas de crescimento. Cardoso *et al.* (2016), ao pesquisarem sobre a produção de sementes de couve-flor, observaram que há um acúmulo significativo de nitrogênio nas inflorescências e nas sementes e redução nas folhas, indicando que o nutriente é translocado das partes vegetativas para as partes reprodutivas da planta. De forma similar, Kano *et al.* (2011), em seus estudos com produção de sementes de alface, constataram que o nitrogênio é mobilizado das folhas para os órgãos reprodutivos, principalmente para as sementes.

O acúmulo total de nitrogênio na planta seguiu um padrão contínuo de crescimento até o final do período de 98 DAT (126 dias após a semeadura), podendo

ser dividido em dois estágios, com o primeiro entre 0 e 28 DAT e o segundo de 29 a 98 DAT, para ambas as doses de fósforo estudadas. O primeiro estágio foi caracterizado por um acúmulo lento de nitrogênio, atingindo 192,0 e 155,3 mg planta⁻¹ (cerca de 8,5% e 8,0% do total acumulado ao final do ciclo) média de 7,07 e 5,54 mg planta⁻¹ dia⁻¹, nas doses de 800 e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente. No segundo estágio, de 29 a 98 DAT, foi registrado acúmulo de 2071,8 e 1774,1 mg planta⁻¹, o que correspondeu a 91,5% e 91,9% do total acumulado, com média de 29,6 e 14,0 mg planta⁻¹ dia⁻¹, nas doses de 800 e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente. Ao final dos 98 DAT, o acúmulo total foi 2263,84 e 1929,4 mg planta⁻¹, dos quais 37% foi acumulado nas folhas, 10% e 15% no caule e 53% e 48% na parte reprodutiva, para as doses de 800 e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente (Figura 6A,6B).

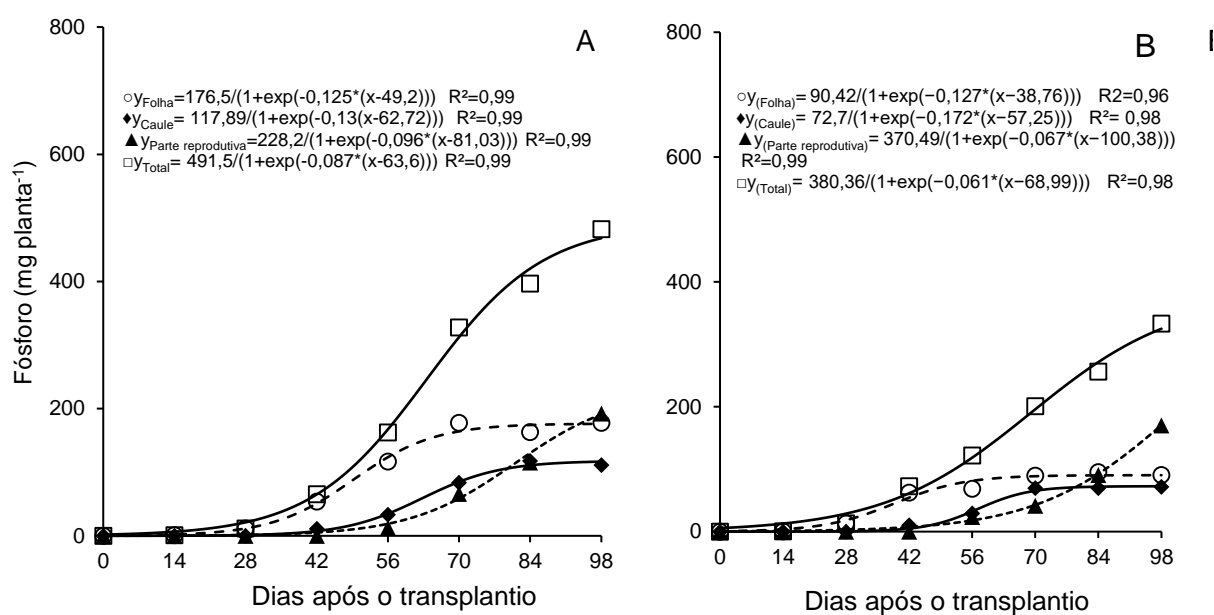
O nitrogênio é um elemento crucial para o desenvolvimento das plantas, sendo absorvido em quantidades significativas por diversas espécies vegetais, especialmente hortaliças, devido à sua importância na formação de proteínas nas sementes (Cardoso, 2011). Este nutriente exerce funções essenciais como constituinte da clorofila, pigmento que possibilita a fotossíntese e a produção de energia; dos aminoácidos, que são os blocos de construção das proteínas; e dos ácidos nucleicos, fundamentais para a replicação e expressão genética (Taiz *et al.*, 2017). Portanto, a deficiência de nitrogênio pode impactar diretamente o crescimento das plantas e a qualidade dos produtos vegetais.

No estágio inicial de desenvolvimento das plantas de alface o acúmulo de fósforo foi lento até os 28 DAT (Figura 7). Entre os 28 e 70 DAT ocorreu aumento no acúmulo de fósforo nas folhas e caule. O acúmulo de fósforo na parte reprodutiva ocorreu de forma intensa após o florescimento, ou seja, após os 70 DAT, com acúmulo de 132,0 (800 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e 127,7 (320 kg ha⁻¹ de P₂O₅) mg planta⁻¹ (69,2% e 74,9% do total acumulado nesses órgãos, respectivamente). A demanda por fósforo na parte reprodutiva cresceu rapidamente, atingindo um máximo próximo ao final do ciclo, com valor de 190,7 (800 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e 170,5 (320 kg ha⁻¹ de P₂O₅) mg planta⁻¹.

O acúmulo total de fósforo seguiu um padrão de crescimento contínuo ao longo de todo o ciclo, e pode ser dividido em dois estágios, com o primeiro de 0 a 28 DAT e o segundo de 29 a 98 DAT, para as duas doses estudadas. No primeiro estágio foi observado acúmulo de 14,3 e 21,7 mg planta⁻¹, o que corresponde a 2,9 e 4,5% do total de fósforo acumulado pela planta ao final do ciclo, para as doses de 800 e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente, uma média de aproximadamente 0,5 e 0,8 mg

planta⁻¹ dia⁻¹. No segundo estágio o acúmulo foi de 469,3 e 311,8 mg planta⁻¹, 97,0% e 93,5% do total acumulado ao final do ciclo, com média de 6,7 e 4,4 mg planta⁻¹ dia⁻¹, nas doses de 800 e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente.

Figura 7- Acúmulo de fósforo nas diferentes partes das plantas de alface destinadas à produção de sementes nas doses de 800 (A) e 320 (B) kg ha⁻¹ de P₂O₅



Na dose de 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅, aos 98 DAT a planta estava com 483,6 mg planta⁻¹ de fósforo, distribuído entre folhas, caule e parte reprodutiva nas proporções de 36%, 24% e 39%, respectivamente. Na dose de 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅, o acúmulo total atingiu máximo de 333,5 mg planta⁻¹ aos 98 DAT, dos quais 27%, 22% e 51% estavam nas folhas, caule e parte reprodutiva, respectivamente.

Na planta, o fósforo é absorvido principalmente na forma de íon fosfato (H₂PO₄⁻) e tende a se acumular em maiores quantidades nos órgãos reprodutivos, como sementes e frutos, nas plantas adultas. A redistribuição do fósforo ocorre de maneira eficiente devido à sua alta mobilidade dentro da planta, movendo-se na forma orgânica por meio do floema, onde sua concentração é elevada (Prado, 2008). Essa capacidade de mobilidade permite que o fósforo seja redirecionado para áreas de

maior demanda, especialmente em fases de desenvolvimento reprodutivo, contribuindo diretamente para a formação de sementes.

O estudo de Kano *et al.* (2011) sobre o acúmulo de nutrientes em alface também revelou um padrão sigmoidal de demanda nutricional, caracterizado por uma baixa necessidade de nutrientes nas primeiras fases de crescimento, seguida de um aumento significativo da demanda após o início do pendoamento (formação do caule reprodutivo). Esse padrão reflete que a planta intensifica a absorção de nutrientes em momentos críticos de desenvolvimento reprodutivo, com posterior diminuição ao final do ciclo.

O fósforo desempenha papel essencial nas células vegetais, sendo componente fundamental de compostos importantes, como os açúcares fosfato, intermediários da respiração e fotossíntese, além dos fosfolipídios que compõem as membranas vegetais. Além disso, o fósforo faz parte dos nucleotídeos essenciais para o metabolismo energético das plantas, como o ATP, e está presente no DNA e RNA (Taiz *et al.*, 2017).

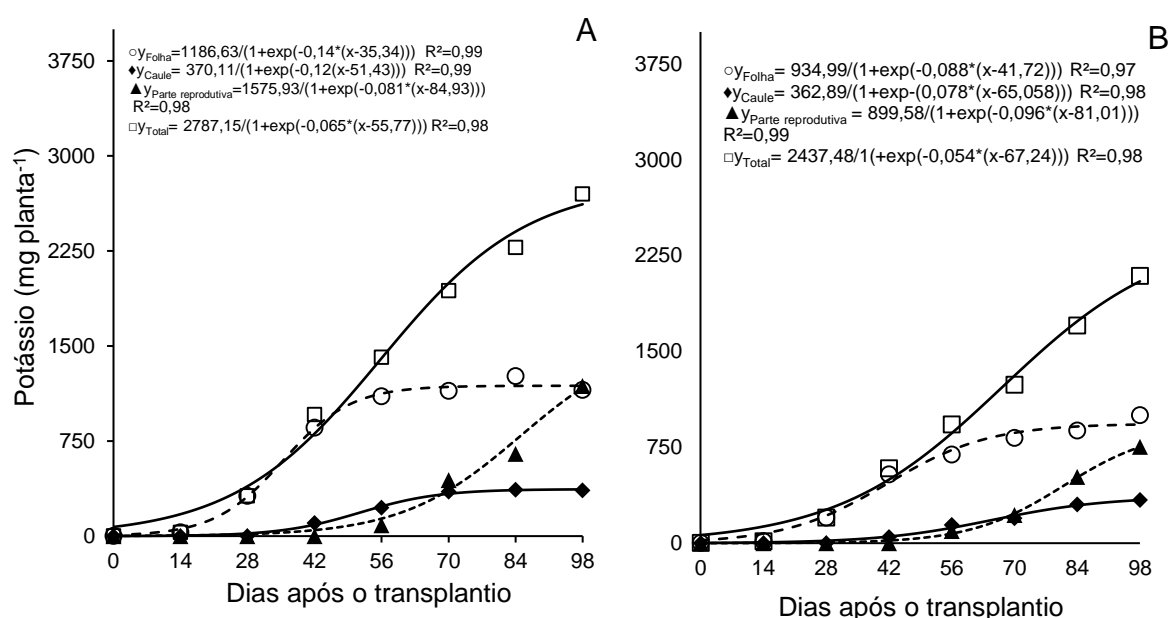
O acúmulo de potássio nas folhas foi bastante intenso até os 56 DAT, tendendo a estabilizar-se a partir desse ponto (Figura 8). O caule, por sua vez, apresentou um acúmulo mais gradual a partir dos 42 DAT, com o crescimento se estabilizando a partir dos 70 DAT. Já o acúmulo de potássio na parte reprodutiva foi o mais tardio entre as partes analisadas, intensificando-se a partir dos 70 DAT de forma quase linear até o final do ciclo.

A curva do acúmulo total, que representa o acúmulo de potássio em toda a planta, seguiu comportamento semelhante ao dos outros nutrientes, nas duas doses estudadas, com crescimento acentuado após os 28 DAT e contínuo até o final do ciclo, sendo possível dividi-la em dois estágios: de 0 a 28 DAT e 29 a 98 DAT. Para a dose de 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅, no primeiro estágio o acúmulo foi relativamente baixo, representando cerca de 12,8% do total, com 349,2 mg por planta e uma média de 12,5 mg planta⁻¹ dia⁻¹. No segundo estágio, de 28 a 98 DAT, o acúmulo foi mais intenso, atingindo em média 2376,0 mg planta⁻¹, o que correspondeu a 87,2% do total acumulado pela planta ao final do ciclo, média de 33,9 mg planta⁻¹ dia⁻¹. Ao final dos 98 DAT a planta estava com 2725,2 mg planta⁻¹ dos quais 57% acumularam-se na parte vegetativa (caule e folhas) e 43% nas partes reprodutivas (Figura 8).

Para a dose de 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅, no primeiro estágio a planta acumulou cerca de 11,8% do potássio total (239,8 mg planta⁻¹), com média de 8,6 mg planta⁻¹ dia⁻¹. No

segundo ocorreu um aumento expressivo no acúmulo de potássio devido ao crescimento do caule e da emissão de ramos florais, sendo observado um acúmulo de 1778,0 mg planta⁻¹ (88,1% do potássio total acumulado ao final do ciclo), com média de 25,4 mg planta⁻¹ dia⁻¹. No final do ciclo, as partes vegetativas e parte reprodutiva apresentaram 63% e 37%, respectivamente do total de potássio acumulado na planta (2017,8 mg planta⁻¹).

Figura 8- Acúmulo de potássio nas diferentes partes das plantas de alface destinadas à produção de sementes nas doses de 800 (A) e 320 (B) kg ha⁻¹ de P₂O₅



Segundo Kano *et al.* (2011), a absorção de nitrogênio, fósforo e potássio nas plantas acompanha o aumento na biomassa da cultura, o que indica que a demanda por esses nutrientes é diretamente proporcional ao crescimento e desenvolvimento da planta.

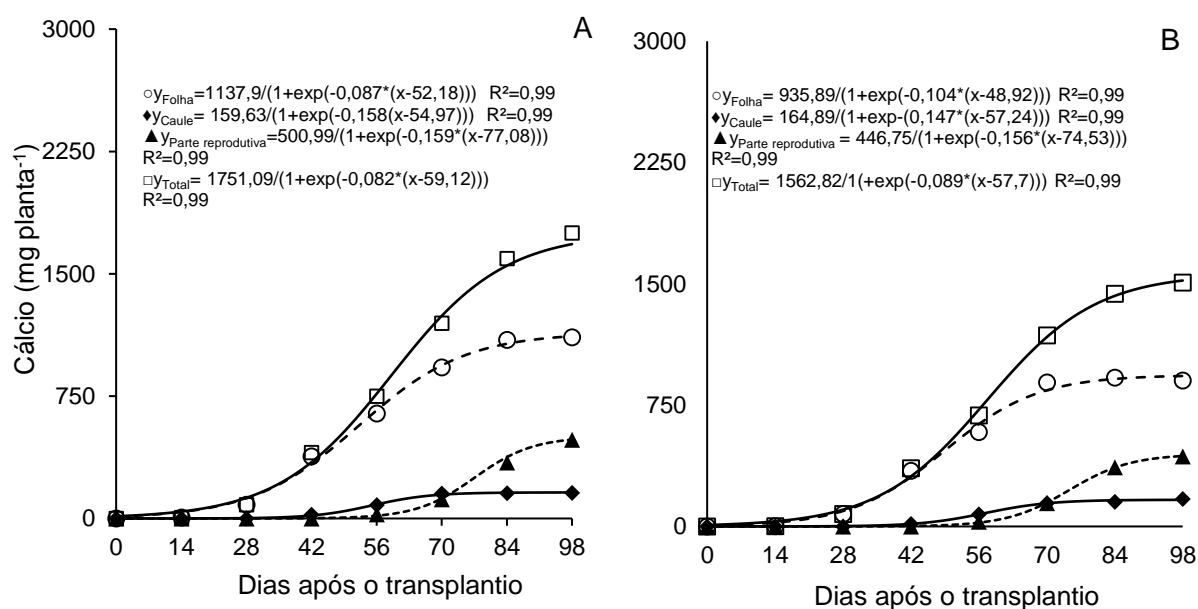
O potássio exerce funções vitais nas plantas, especialmente na regulação do potencial osmótico das células vegetais, o que afeta diretamente a capacidade das células de reter água e manter a turgidez. Esse elemento é essencial para a abertura e fechamento dos estômatos, influenciando a transpiração e a troca gasosa, processos críticos para a fotossíntese. Além disso, o potássio atua como ativador de

várias enzimas envolvidas nos processos de respiração e fotossíntese, garantindo a eficiência dessas reações metabólicas (Taiz *et al.*, 2017).

A deficiência de potássio na planta resulta em redução da fotossíntese e aumento na taxa de respiração. Essa situação leva a uma diminuição no acúmulo de carboidratos, o que afeta negativamente o crescimento e a produção de biomassa da planta, prejudicando tanto o desenvolvimento vegetativo quanto a produtividade agrícola (Novais *et al.*, 2007). Conforme observado por Kano *et al.* (2006), a falta de potássio também impacta negativamente a produção de sementes em alface.

O cálcio apresentou um acúmulo acentuado nas folhas até 70 DAT, e gradual no caule durante todo o ciclo da planta de alface (Figura 9). Na parte reprodutiva o acúmulo de cálcio foi mais acentuado a partir dos 70 DAT, sendo que 65,3% (800 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e 66,1% (320 kg ha⁻¹ de P₂O₅) do total de cálcio acumulado nestas partes ocorreu depois desse período.

Figura 9. Acúmulo de cálcio nas diferentes partes das plantas de alface destinadas à produção de sementes nas doses de 800 (A) e 320 (B) kg ha⁻¹ de P₂O₅



Na dose de 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅, a curva de acúmulo total de cálcio mostra um crescimento contínuo até os 98 DAT, com uma taxa mais pronunciada entre 28 a 70 DAT, período em que a planta acumulou cerca de 65% do cálcio total (1081,3 mg

planta⁻¹), com média de 25,7 mg planta⁻¹ dia⁻¹. Após os 70 DAT a planta acumulou cerca de 31,4% do total de cálcio, e o acúmulo médio diário passou à 19,7 mg planta⁻¹ dia⁻¹ até o final do ciclo (Figura 9). Ao final do ciclo, a planta estava com 1760,2 mg planta⁻¹ de cálcio, dos quais 73% e 27% estavam na parte vegetativa e parte reprodutiva, respectivamente. Kano *et al.* (2011) observaram que cerca de 35% do cálcio em sementes de alface é absorvido após o início da floração, pouco acima do observado nesse estudo, com a cultivar Solaris.

Na dose de 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅, foi observado o mesmo comportamento para a curva de acúmulo total de cálcio, com uma taxa mais pronunciada dos 28 aos 70 DAT, acúmulo de 1034,5 mg planta⁻¹ (67,6% do total acumulado aos 98 DAT), média de 24,6 mg planta⁻¹ dia⁻¹. Após os 70 DAT, a planta acumulou 26% do total de cálcio. Foi observado um total de 1530,2 mg planta⁻¹ de cálcio no final do ciclo, distribuído entre os diferentes órgãos nas proporções de 72% e 28% na parte vegetativa e reprodutiva, respectivamente.

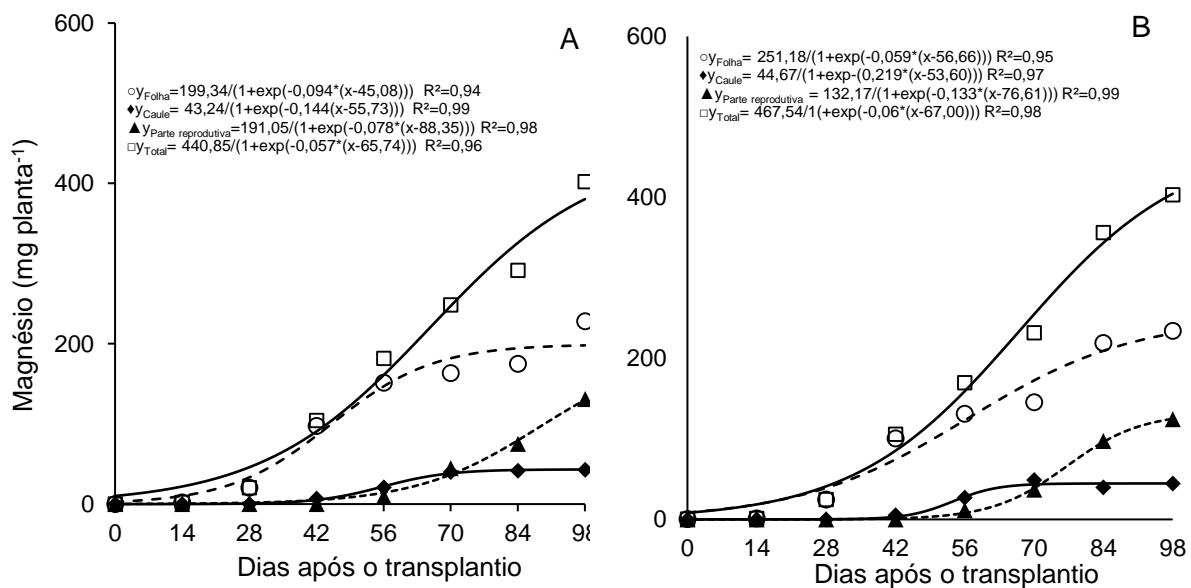
Os íons de cálcio (Ca²⁺) desempenham papel essencial nas plantas, tanto no nível estrutural quanto no de sinalização celular. Estruturalmente, o cálcio atua na parede celular e no espaço apoplástico, ligando-se a grupos ácidos de lipídios da membrana, como os fosfolipídios e sulfolipídios, o que contribui para a estabilidade e integridade das membranas. Além desse papel estrutural, o cálcio funciona como mensageiro secundário na sinalização celular, sendo crucial para a resposta das plantas a diversos estímulos ambientais (Taiz *et al.*, 2017). Essa dualidade funcional torna o cálcio um elemento-chave para o crescimento saudável e a capacidade adaptativa das plantas.

A curva de acúmulo de magnésio nas folhas foi semelhante ao do cálcio, com valores mais pronunciados nas folhas até os 70 DAT, e gradual no caule ao longo do ciclo, atingindo o máximo acumulado ao final dos 98 DAT (Figura 10). Na parte reprodutiva o acúmulo de magnésio foi mais intenso a partir dos 70 DAT, com cerca de 71,6% (800 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e 69% (320 kg ha⁻¹ de P₂O₅) do magnésio acumulado depois desse período.

O acúmulo total de magnésio foi lento do transplântio até os 28 DAT, para as duas doses estudadas. Na dose de 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅, obteve-se média de 1,3 mg planta⁻¹ dia⁻¹. Dos 29 aos 98 DAT o acúmulo médio passou à 4,8 mg planta⁻¹ dia⁻¹, com cerca de 90,3% do total de magnésio acumulado nesse período. O acúmulo total de

magnésio na planta seguiu uma tendência de crescimento contínuo até o final dos 98 DAT, obtendo-se o total acumulado de 371,0 mg planta⁻¹, sendo que 65% estavam na parte vegetativa e 35% nas partes reprodutivas (Figura 10). Na dose de 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅, obteve-se média de 1,4 mg planta⁻¹ dia⁻¹. Dos 29 aos 98 DAT o acúmulo médio passou à 5,1 mg planta⁻¹ dia⁻¹, com cerca de 90,1% do total de magnésio acumulado nesse período. O acúmulo total de magnésio na planta seguiu uma tendência de crescimento contínuo até o final dos 98 DAT, obtendo-se o máximo acumulado de 400,6 mg planta⁻¹, sendo que 69% estavam na parte vegetativa e 31% nas partes reprodutivas (Figura 16).

Figura 10- Acúmulo de magnésio nas diferentes partes das plantas de alface destinadas à produção de sementes nas doses de 800 (A) e 320 (B) kg ha⁻¹ de P₂O₅

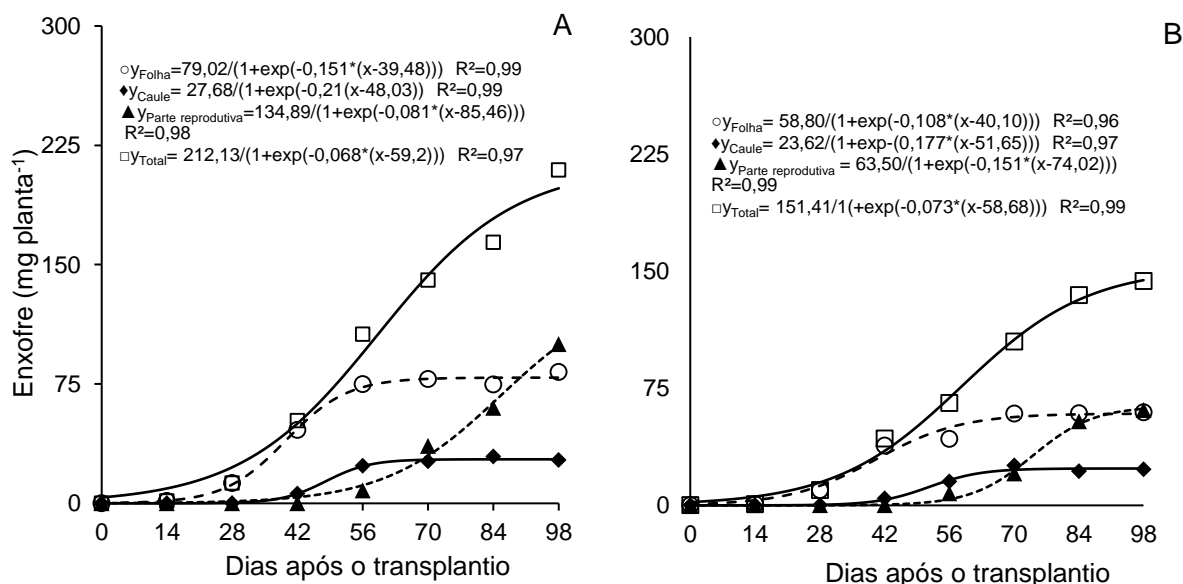


O magnésio (Mg²⁺) desempenha papel específico e multifuncional, atuando como um ativador de várias enzimas essenciais envolvidas em processos vitais, como a respiração, a fotossíntese e a síntese de DNA e RNA, o que torna sua presença indispensável para o metabolismo e a replicação celular (Taiz *et al.*, 2017). Além disso, conforme apontado por Novais *et al.* (2007), o magnésio contribui para o transporte de carboidratos das folhas para outras partes da planta, assegurando que os produtos

da fotossíntese cheguem aos órgãos de crescimento e reserva. Ele também estimula a absorção e o transporte de fósforo dentro da planta, facilitando a disponibilidade e a mobilidade desse nutriente para os processos metabólicos.

O acúmulo de enxofre nas folhas foi mais acentuado dos 28 aos 56 DAT (Figura 11), nas doses de 800 e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅, com cerca de 77,6% e 85% do total acumulado nestes órgãos ocorrendo nesse intervalo (61,3 e 49,8 mg planta⁻¹). No caule, o acúmulo de enxofre tendeu a estabilização a partir dos 70 DAT, com um acúmulo mais lento até os 98 DAT, onde foi observado um máximo de 27,6 e 23,6 mg planta⁻¹, nas doses de 800 e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente. Na parte reprodutiva o acúmulo de enxofre foi mais expressivo a partir dos 70 DAT, onde 69,7% e 63,7% do enxofre foi acumulado depois desse período, finalizando o ciclo com 90,0 e 61,8 mg planta⁻¹, nas doses de 800 e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente.

Figura 11- Acúmulo de enxofre nas diferentes partes das plantas de alface destinadas à produção de sementes nas doses de 800 (A) e 320 (B) kg ha⁻¹ de P₂O₅



Assim como os demais macronutrientes, a curva de acúmulo total de enxofre apresentou uma tendência de crescimento contínuo até os 98 DAT (Figura 11), e assim como o nitrogênio, pode ser dividida em dois períodos de acúmulo. O primeiro período ocorreu de 0 a 28 DAT, com acúmulo mais lento. Na dose de 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅, foi

observado um valor médio de $13,5 \text{ mg planta}^{-1}$ (6,7% do total acumulado ao final do ciclo), média de $0,5 \text{ mg planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. No segundo estágio, de 29 a 98 DAT, o acúmulo foi de $192,2 \text{ mg planta}^{-1}$ (93,4% do total acumulado), e média de $7,7 \text{ mg planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. Ao final do ciclo, foi observado acúmulo total de $205,7 \text{ mg planta}^{-1}$ de enxofre, distribuído entre os diferentes órgãos nas proporções de 51% e 49% na parte vegetativa e reprodutiva, respectivamente. Na dose de 320 kg ha^{-1} de P_2O_5 , no primeiro estágio foi observado acúmulo de $12,9 \text{ mg planta}^{-1}$ (9% do total acumulado aos 98 DAT), média de $0,46 \text{ mg planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. No segundo estágio, o acúmulo foi de $131,2 \text{ mg planta}^{-1}$ (91,0% do total acumulado), média de $1,8 \text{ mg planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. Foi registrado um acúmulo total de $144,1 \text{ mg planta}^{-1}$ no final do ciclo, distribuído entre os órgãos vegetativos e reprodutivos nas proporções de 57% e 43%, respectivamente.

Em brássicas é comumente relatado o acúmulo de uma grande quantidade de enxofre nos órgãos reprodutivos, como observado por Bezerra (2023) em plantas de rúcula para a produção de sementes, embora em outras hortaliças folhosas como alface não seja comum, como observado por Kano *et al.* (2011). No entanto, no presente estudo, foi identificado um acúmulo significativo de enxofre na parte reprodutiva da alface.

O enxofre (S) é um nutriente essencial para as plantas, presente em aminoácidos específicos como cistina e cisteína, que são fundamentais para a estrutura e função das proteínas. Esses aminoácidos contendo enxofre desempenham papel importante na formação de pontes de dissulfeto, que conferem estabilidade estrutural às proteínas. Além disso, o enxofre é um componente essencial de várias coenzimas e vitaminas envolvidas no metabolismo vegetal, atuando em reações bioquímicas críticas que sustentam o crescimento e o desenvolvimento das plantas (Taiz *et al.*, 2017).

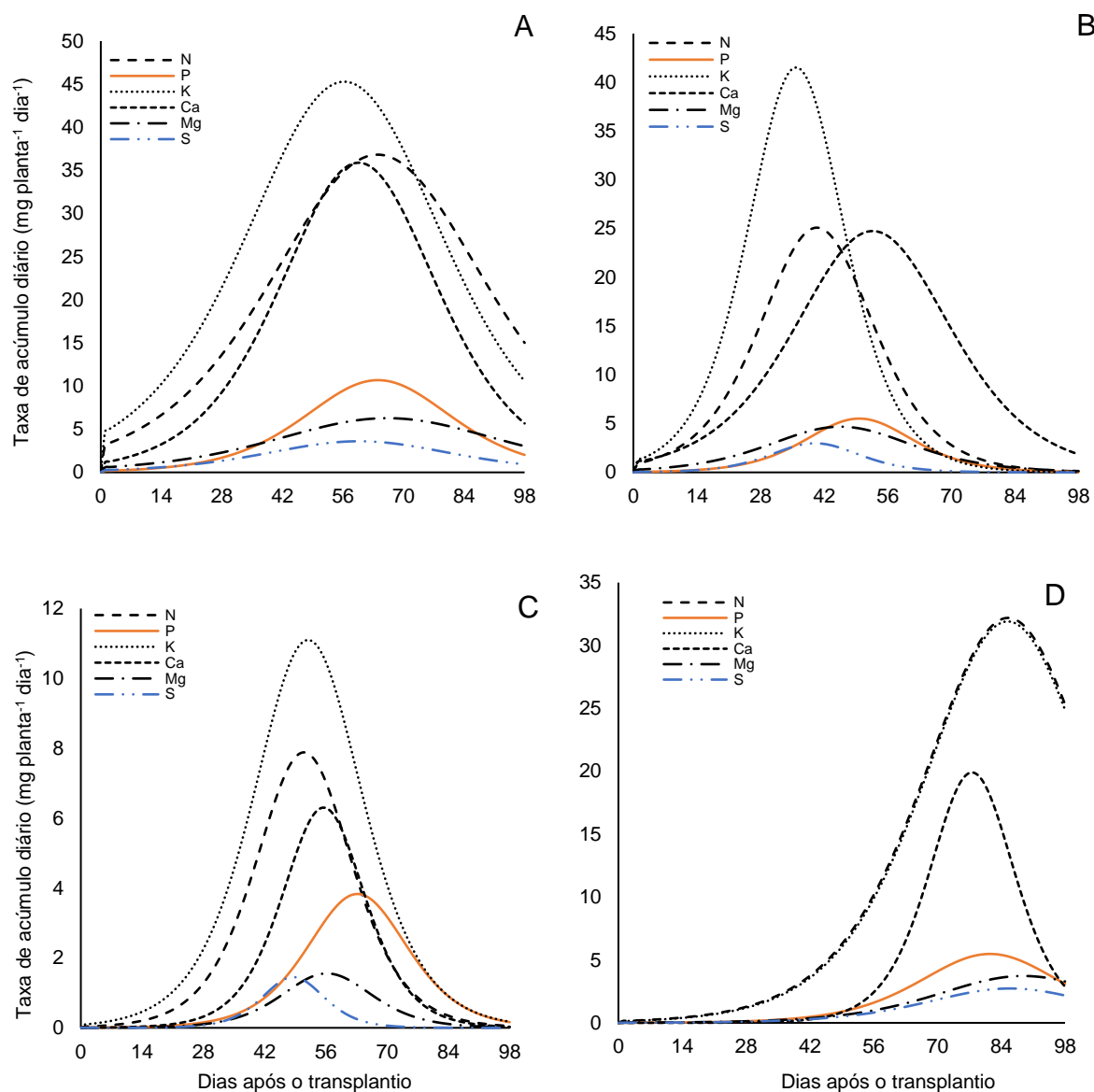
3.3.6 Taxa de acúmulo diário

A Figura 12 representa a taxa de acúmulo diário de macronutrientes em plantas de alface ao longo do ciclo de 98 DAT para a dose de 800 kg ha^{-1} de P_2O_5 , considerando o total acumulado em todas as partes da planta (A), nas folhas (B), caule (C) e parte reprodutiva (B). Os resultados indicam diferenças na dinâmica de absorção

e na demanda máxima de cada nutriente, refletindo as necessidades fisiológicas específicas ao longo do ciclo de desenvolvimento.

O período de maior demanda nutricional da planta ocorreu entre 57 e 65 DAT, com diferenças específicas entre os macronutrientes. Na planta, o nitrogênio (N) alcançou sua taxa máxima de acúmulo diário com um pico de $36,8 \text{ mg planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ aos 64 DAT, fósforo e magnésio com $10,7$ e $6,3 \text{ mg planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ aos 65 DAT, respectivamente, o potássio com $45,3 \text{ mg planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ aos 57 DAT, o cálcio e o enxofre com $36,0$ e $3,6 \text{ mg planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ aos 60 DAT (Figura 12 A).

Figura 12- Taxa de acúmulo diário de macronutrientes pela parte aérea total (A), folhas (B), caule (C) e parte reprodutiva (D) das plantas de alface em função dos dias após a semeadura, na dose de 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅



Na parte vegetativa a taxa máxima de acúmulo diário ocorreu entre 40 e 53 DAT. A taxa máxima nas folhas foi de 25,0 e 3,0 mg planta⁻¹ dia⁻¹ para o nitrogênio e enxofre, respectivamente, aos 40 DAT, 5,5 mg planta⁻¹ dia⁻¹ para o fósforo aos 50 DAT, 41,5 mg planta⁻¹ dia⁻¹ para o potássio aos 36 DAT, 24,7 mg planta⁻¹ dia⁻¹ para o cálcio aos 53 DAT, 4,7 mg planta⁻¹ dia⁻¹ para o magnésio aos 46 DAT (Figura 12B). No caule, a taxa máxima de acúmulo diário foi de 8,0 e 11,1 mg planta⁻¹ dia⁻¹ para o nitrogênio e o potássio aos 51 DAT, enquanto o fósforo alcançou 3,8 mg planta⁻¹ dia⁻¹ aos 63 dias,

seguido pelo cálcio e o magnésio com 6,3 e 1,5 mg planta⁻¹ dia⁻¹, ambos aos 56 dias. O enxofre, por sua vez, apresentou a menor taxa máxima de acúmulo diário, com 1,4 mg planta⁻¹ dia⁻¹ aos 49 dias (Figura 12 C).

Na parte reprodutiva, a taxa máxima de acúmulo diário foi registrada em diferentes momentos para cada macronutriente, com picos entre 79 e 88 DAT. O nitrogênio, o potássio e o enxofre atingiram os maiores valores, com 32, 31,9 e 2,7 mg planta⁻¹ dia⁻¹, respectivamente, todos aos 85 DAT. O fósforo apresentou um pico de 5,5 mg planta⁻¹ dia⁻¹ aos 81 DAT, enquanto o cálcio alcançou 19,9 mg planta⁻¹ dia⁻¹ aos 79 DAT e o magnésio teve máximo mais próximo ao final do ciclo, com 3,7 mg planta⁻¹ dia⁻¹ aos 88 DAT (Figura 12D).

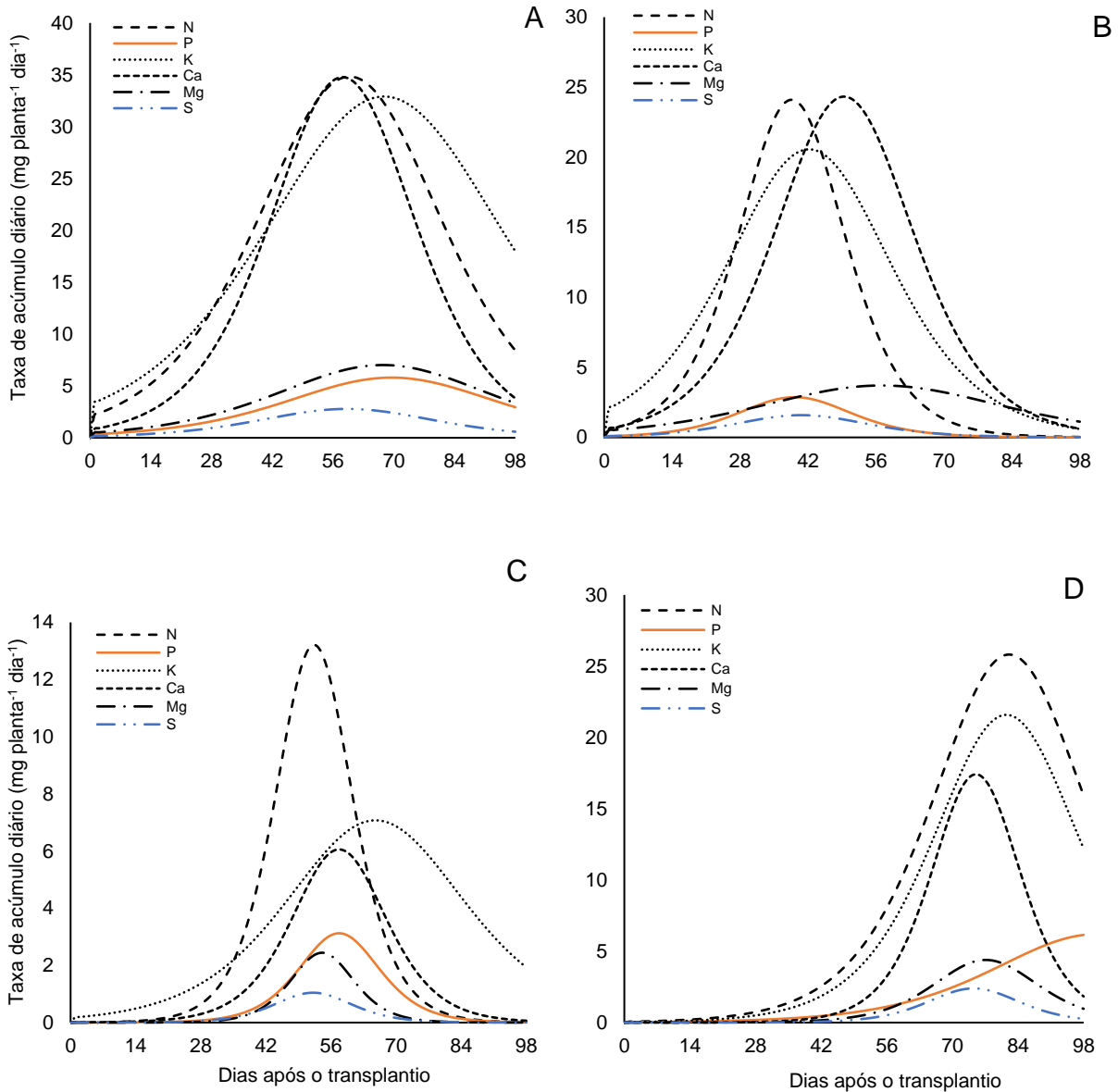
Para a dose de 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅ o período de maior demanda na planta ocorreu entre 58 e 68 DAT. A taxa máxima de acúmulo diário foi 34,8 mg planta⁻¹ dia⁻¹ aos 58 DAT para o nitrogênio e cálcio, e 2,8 mg planta⁻¹ dia⁻¹ para o enxofre no mesmo período, enquanto para fósforo, potássio e magnésio foi aos 68 DAT com uma taxa de 5,8, 32,9, 7,0 mg planta⁻¹ dia⁻¹, respectivamente.

Na parte vegetativa a taxa de acúmulo diário foi mais acentuada entre 38 e 56 DAT, com as folhas atingindo o pico antes do caule. Nas folhas, foi observado taxa máxima diária de 24,1 e 2,9 mg planta⁻¹ dia⁻¹ aos 38 DAT para o nitrogênio e o fósforo, respectivamente. O potássio atingiu o máximo aos 42 DAT com uma taxa de 20,6 mg planta⁻¹ dia⁻¹, enquanto o cálcio atingiu o máximo aos 49 DAT com taxa de 24,3 mg planta⁻¹ dia⁻¹. O magnésio foi o que mais demorou a atingir o máximo, ocorrendo aos 56 DAT, com taxa de 3,7 mg planta⁻¹ dia⁻¹, enquanto o enxofre foi o nutriente com menor taxa de acúmulo máximo, apenas 1,6 mg planta⁻¹ dia⁻¹, alcançada aos 40 DAT. No caule, o nitrogênio, magnésio e enxofre alcançaram o seu máximo aos 52 DAT, com taxa de 13,2, 2,4 e 1,0 mg planta⁻¹ dia⁻¹, respectivamente. Fósforo e cálcio apresentaram taxa máxima de acúmulo diário de 3,1 e 6,1 mg planta⁻¹ dia⁻¹ aos 58 DAT, enquanto o potássio atingiu a taxa máxima de 7,1 mg planta⁻¹ dia⁻¹ aos 65 DAT, portanto, sendo o mais tardio a atingir a taxa máxima.

Na parte reprodutiva, o período de maior demanda ocorreu entre 75 e 81 DAT para a maioria dos macronutrientes, exceto para o fósforo que apresentou demanda contínua até o final do ciclo. O nitrogênio e o potássio alcançaram uma taxa máxima de 25,8 e 21,6 mg planta dia aos 81 DAT, respectivamente. Por outro lado, o cálcio,

magnésio e enxofre, alcançaram a taxa máxima de 17,4, 4,4 e 2,4 mg planta⁻¹ dia⁻¹ aos 75 DAT, respectivamente.

Figura 13- Taxa de acúmulo diário de macronutrientes pela planta de alface total (A), folha (B), caule (C) e parte reprodutiva (D), em função dos dias após a semeadura, na dose de 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅



De forma geral, a demanda por nutrientes foi mais intensa entre 40 e 70 DAT e 80 a 90 DAT, na parte vegetativa e reprodutiva, respectivamente, período em que se

observou a maior taxa de acúmulo diário de todos os macronutrientes, com destaque para o N, K e Ca, independentemente da dose de fósforo aplicada.

Segundo Cardoso (2011), na fase final de maturação das sementes a demanda por N, P e K na planta se reduz, provavelmente pela senescência das folhas e predomínio da redistribuição destas para a parte reprodutivas. Já o Ca, Mg e S ainda apresentam elevada demanda na fase final, pelo menos mais de 1/3, com pouca redistribuição das partes vegetativas para a reprodutiva.

É importante destacar que, na menor dose de fósforo avaliada (320 kg ha^{-1} de P_2O_5), a demanda por esse nutriente manteve-se crescente até o momento da colheita, aos 98 DAT. Em contraste, na dose de 800 kg ha^{-1} de P_2O_5 , o máximo acúmulo foi registrado aos 81 DAT, indicando que, com a menor quantidade de fósforo fornecida, a planta não atingiu seu limite de acúmulo. Esses resultados sugerem que, na dose reduzida, a necessidade de fósforo permanece elevada até o final do ciclo, refletindo uma demanda “reprimida” nesse período.

3.4 CONCLUSÕES

O cultivo de alface para produção de sementes requer maior tempo e manejo nutricional específico, com maior demanda de nutrientes nas fases de crescimento ativo (40 a 70 DAT) e maturação (80 a 90 DAT).

O potássio e o nitrogênio, nessa ordem, destacam-se como os elementos mais acumulados ao longo do ciclo de alface para a produção de sementes.

REFERÊNCIAS

- BEZERRA, S. R. B. **Curva de crescimento e desenvolvimento de plantas de brócolis e rúcula, e a absorção e o acúmulo de nutrientes para a produção de sementes em sistema orgânico**. Tese (Doutorado em Agronomia – Horticultura) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2024, 88 p.
- CARDOSO, A. I. I. **Doses de potássio na produção e qualidade de sementes de alface (*Lactuca sativa* L.)**. Relatório científico, Processo FAPESP nº 03/09637-0. 2005. 25 p.
- CARDOSO, A. I. I. Nutrição e adubação em campos de produção de sementes de hortaliças. In: NASCIMENTO, W. M. (org.). **Hortaliças: tecnologia de produção de sementes**. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2011. p. 109-134.
- CARDOSO, A. I. I.; CLAUDIO, M. T. R.; NAKADA-FREITAS, P. G.; MAGRO, F. O.; TAVARES, A. E. B. Phosphate fertilization over the accumulation of macronutrients in cauliflower seed production. **Horticultura Brasileira**, v. 34, 2016, p. 196-201.
- CRUZ, R. **Curva de acúmulo de nutrientes em dois cultivares de alface crespa**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, 2019, 59 p.
- FATIMA, R. T.; JESUS, E. G.; GUERRERO, A. C.; ROCHA, J. L. A.; BRITO, M. E. B. Crescimento e trocas gasosas em alface cultivada sob regimes hídricos e adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, n. 3, 2018, p. 2683.
- FENG, S. W.; RU, Z. G.; DING, W. H.; HU, T. Z.; LI, G. Study of the relationship between field lodging and stem quality traits of winter wheat in the North China Plain. **Crop and Pasture Science**, v. 70, 2019, p. 772-780.
- FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. 3. ed. rev. e ampl. Viçosa, MG: UFV, 2013.
- FRANCO, J. R.; DAL PAI, E.; CALÇA, M. V. C.; RANIERO, M. R.; DAL PAI, A.; SARNIGHAUSEN, V. C. R.; ROMÁN, R. M. S. Atualização da normal climatológica e classificação climática de Köppen para o município de Botucatu-SP. **Irriga**, v. 28, n. 1, 2023, p. 77-92.
- HAO, J.; YANG, J.; LIU, X. Molecular basis of high temperature-induced bolting in lettuce revealed by multi-omics analysis. **BMC Genomics**, v. 23, p. 580, 2022.
- HIRAOKA, T. Ecological studies on the salad crops. II. Effect of photoperiods on flower bud differentiation, bolting and heading in lettuce, with special reference to the difference of photoperiodic sensibility between varieties on various growing stages. **Journal of Japanese Society for Horticultural Science**, Tokyo, v. 4, n. 411, 1967 p. 39-48.

HIRAOKA, T. Ecological studies on the salad crops. III. Effects of combination of temperature treatments on flower bud differentiation, bolting, budding and flowering time, of head lettuce (*Lactuca sativa* L. cultivar Wayahead, Edogawa strain). **Journal of Japanese Society for Horticultural Science**, Tokyo, n. 38, 1969, p. 42-51.

IZZELDIN, H.; LIPPERT, L. F.; TAKATORI, F. H. An influence of water stress at different growth stages on yield and quality of lettuce seed. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 105, n. 1, 1980, p. 68-71.

JEONG, S. J.; ZHANG, Q.; NIU, G.; ZHEN, S. The interactive effects between far-red light and temperature on lettuce growth and morphology diminish at high light intensity. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, 2024, p. 1497672.

JORGETTO, L. O. **Compostos orgânicos enriquecidos com fósforo em cultivos sucessivos de alface**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, 2019, 77 p.

KANO, C.; CARDOSO, A. I. I.; BOAS, V.; LYRA, R. Acúmulo de nutrientes e resposta da alface à adubação fosfatada. **Biotemas**, v. 25, n. 3, 2012, p. 39-47.

KANO, C.; CARDOSO, A. I. I.; HIGUTI, A. R. O.; VILLAS BÔAS, R. L. Doses de potássio na produção e qualidade de sementes de alface. **Horticultura Brasileira**, v. 24, 2006, p. 356-359.

KANO, C.; CARDOSO, A. I. I.; VILLAS BÔAS, R. L. Acúmulo de nutrientes pela alface à produção de sementes. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 1, 2011, p. 70-77.

LIMA, T. C. A. A.; LOPES, M. C.; COELHO, J. C. Concentração e acúmulo de nutrientes em alface cultivadas em sistema hidropônico. In: **IX Jornacitec** – Jornada Científica e Tecnológica. 2020.

LOBO, T. H.; GRASSI FILHO, H.; BIUDES, E. P. Nitrogênio orgânico e químico na cultura da alface. **Colloquium Agrariae**, v. 16, n. 4, 2020, p. 71-79.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. Princípios, métodos e técnicas de avaliação do estado nutricional. In: MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. (org.). **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. p. 115-230.

MAPA. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos**. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília, DF: MAPA, 2017. 240 p.

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017 p.

OLIVEIRA, D. T.; PIRES, L. F. O.; CURY, J. Avaliação de adubação fosfatada no desenvolvimento da alface crespa: um artigo original. **Anais...** 3º Simpósio de TCC das Faculdades FINOM e Tecsoma, 2020, p. 154-158.

PRADO, R. M. **Nutrição de plantas**. São Paulo: UNESP, 2008. p. 181-200.

QUADROS, B. R.; MAGRO, F. O.; CORRÊA, C. V.; CARDOSO, A. I. I. Acúmulo de nutrientes em sementes de alface em função de doses de composto orgânico com e sem adição de fósforo ao solo. **Revista Cultivando o Saber**, v. 3, n. 2, 2010, p. 106-115.

REGHIN, M. Y.; OTTO, R. F.; ROCHA, A. Indução do florescimento e produção de sementes de alface com diferentes doses de ácido giberélico. **Horticultura Brasileira**, v. 18, n. 3, 2000, p. 171-175.

REIS, W. **Aplicação de pó de rocha e enxofre elementar associado a plantas de cobertura do solo, na disponibilidade de nutrientes para a cultura do milho**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2020, 68 p.

RYDER, E. J. **Lettuce, endive and chicory**. Wallingford: CABI Publishing, 1999. 224 p.

SÁ, J. M.; CARDOSO, A. I. I.; SEGUCHI, D. S.; ÁVILA, J.; CARVALHO, J. R.; SOUZA, E. P.; NAKADA-FREITAS, P. G. Growth curve and nutrient accumulation in lettuce for seed production under organic system. **Horticulturae**, v. 11, n. 6, 2025, p. 707.

SANTOS, H. G.; SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 353 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p.

TRANI, P. E.; RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; FIGUEIREDO, G. J. B. Hortaliças. In: CANTARELLA, H. et al. (org.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 2022. p. 339-424.

CAPÍTULO 4

DOSES E FONTES DE FÓSFORO NO ACÚMULO DE MACRONUTRIENTES EM PLANTAS DE ALFACE DESTINADAS À PRODUÇÃO DE SEMENTES

RESUMO

O manejo adequado da adubação é essencial para otimizar o uso de nutrientes e alcançar altas produtividades em alface, especialmente em sistemas orgânicos e na produção de sementes, onde as exigências nutricionais são maiores devido ao ciclo mais longo das plantas. Fontes de fósforo, como o termofosfato e o superfosfato triplo, apresentam características distintas de solubilidade e liberação de nutrientes, podendo influenciar diretamente o acúmulo de nutrientes nas plantas e sementes. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi avaliar o acúmulo de macronutrientes na planta e nas sementes de alface sob diferentes doses e fontes de fósforo no plantio. O experimento foi conduzido em ambiente protegido na Fazenda Experimental de São Manuel, localizada no município de São Manuel, SP, pertencente a UNESP/FCA, campus de Botucatu, SP. Foram estudados quatro tratamentos em delineamento de blocos ao acaso, em um fatorial 2 x 2, com duas doses de fósforo no plantio (320 e 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e duas fontes de fósforo (orgânica - termofosfato - e inorgânica - superfosfato triplo). Aos 98 dias após o transplântio foram colhidas as plantas, e separadas em folha e caule (parte vegetativa) e parte reprodutiva, extraindo-se as sementes desta, para determinação do acúmulo de massa seca e de macronutrientes em cada parte e na planta (total). Os dados foram submetidos a análise de variância e teste de média. A aplicação de 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅ promoveu o maior acúmulo de biomassa e nutrientes na alface. O manejo convencional favoreceu a absorção de nitrogênio e fósforo, enquanto o manejo orgânico destacou-se para potássio e cálcio nas sementes. A distribuição dos macronutrientes variou conforme a dose e a fonte de fósforo, com predomínio de N, P e Ca na planta. Nas sementes, a sequência de acúmulo manteve-se constante (N > K > P > Ca > Mg > S) e aos 98 DAT as sementes representaram cerca de 8% da massa seca total, com 33% de N, 10% de K, 42% de P, 8% de Ca, 21% de Mg e 24% de S acumulados nessa parte.

Palavras-chave: *Lactuca sativa* L.; adubação fosfatada; manejo orgânico; termofosfato; superfosfato triplo.

ABSTRACT

Proper fertilization management is essential to optimize nutrient use and achieve high yields in lettuce, especially in organic systems and seed production, where nutritional demands are higher due to the longer plant cycle. Phosphorus sources, such as thermophosphate and triple superphosphate, have distinct solubility and nutrient release characteristics, which can directly influence nutrient accumulation in plants and seeds. Therefore, the objective of this study was to evaluate macronutrient accumulation in lettuce plants and seeds under different phosphorus rates and sources at planting. The experiment was conducted in a protected environment at the São Manuel Experimental Farm, located in São Manuel, SP, belonging to UNESP/FCA, Botucatu campus. Four treatments were studied in a randomized block design in a 2 × 2 factorial arrangement, with two phosphorus rates at planting (320 and 800 kg ha⁻¹ of P₂O₅) and two phosphorus sources (organic –thermophosphate – and inorganic – triple superphosphate). At 98 days after transplanting, plants were harvested and separated into leaves and stems (vegetative part) and reproductive parts, from which seeds were extracted to determine dry matter and macronutrient accumulation in each part and the whole plant. Data were subjected to analysis of variance and mean comparison tests. Application of 800 kg ha⁻¹ of P₂O₅ promoted the highest biomass and nutrient accumulation in lettuce. Conventional management favored nitrogen and phosphorus uptake, while organic management stood out for potassium and calcium in the seeds. Macronutrient distribution varied according to phosphorus rate and source, with N, P, and Ca predominating in the plant. In seeds, the accumulation sequence remained constant (N > K > P > Ca > Mg > S), and at 98 DAT, seeds represented approximately 8% of total dry matter, with 33% of N, 10% of K, 42% of P, 8% of Ca, 21% of Mg, and 24% of S accumulated in this part.

Keywords: *Lactuca sativa* L.; phosphorus fertilization; organic management; thermophosphate; triple superphosphate.

4.1 INTRODUÇÃO

O manejo adequado da adubação é um dos pilares fundamentais para alcançar altas produtividades, otimizando o uso de fontes orgânicas e minerais para explorar o máximo potencial das culturas (Martins *et al.*, 2022). Para que a planta receba todos os nutrientes na quantidade e no momento adequados, o manejo da adubação deve integrar um conjunto de práticas planejadas. Enquanto algumas espécies possuem recomendações de adubação bem estabelecidas, baseadas em extensas pesquisas, para muitas hortaliças esses estudos são limitados, especialmente quando o objetivo é a produção de sementes (Cardoso, 2011).

Kano *et al.* (2006, 2012), Magro *et al.* (2010), Quadros *et al.* (2012), Cardoso *et al.* (2016) e Sá *et al.* (2025) relataram que a quantidade de nutrientes necessária para a produção de sementes é maior do que a requerida para a obtenção do produto comercial em espécies em que o ciclo é mais longo para a produção de sementes, como a alface e as brássicas. Segundo Carvalho e Nakagawa (2012), a nutrição adequada desempenha papel crucial na obtenção de sementes bem formadas, sendo a fase de formação das sementes o período de maior demanda nutricional, caracterizado pela intensa translocação de nutrientes para os órgãos reprodutivos.

O entendimento da quantidade de nutrientes acumulados pelas plantas, especialmente na parte colhida, é fundamental para avaliar a remoção de nutrientes e estabelecer recomendações econômicas de adubação. No entanto, há variações significativas entre as espécies quanto às quantidades totais de nutrientes exigidas em relação à sua produtividade (Malavolta; Vitti; Oliveira, 1997).

Um dos maiores problemas de fertilidade dos solos no Brasil refere-se ao fósforo (P), pois, além de a maioria deles serem pobres neste nutriente, eles são altamente fixadores desse nutriente, que não fica disponível para as plantas. As principais fontes de fósforo na adubação são os superfosfatos, simples e triplo. Porém, estes não podem ser utilizados no sistema orgânico.

A ausência de estudos específicos sobre a fertilização fosfatada na produção de sementes sob manejo orgânico representa uma lacuna significativa no entendimento das práticas agrícolas voltadas para a sustentabilidade e eficiência. Embora estudos prévios com sementes de alface indiquem que os nutrientes nitrogênio (N), potássio (K) e fósforo (P) estão entre os mais acumulados nas sementes (Bezerra *et al.*, 2023; Quadros *et al.*, 2010; Kano *et al.*, 2011), esses dados foram obtidos

predominantemente em sistemas de manejo convencional, com uso de fertilizantes minerais solúveis.

A produção orgânica, por sua vez, adota princípios baseados no uso de fontes de nutrientes de liberação gradual, que diferem em sua dinâmica de disponibilização em comparação aos fertilizantes sintéticos. Essa diferença pode impactar a quantidade dos nutrientes disponibilizados e acumulados na planta e, conseqüentemente, nas sementes. Além disso, o fósforo, sendo um elemento essencial para os processos de armazenamento de energia e desenvolvimento reprodutivo, é frequentemente limitante em solos tropicais ricos em óxidos de ferro e alumínio, que faz com que fique indisponível às plantas. Além disso, como o P é um recurso natural e finito, a otimização de sua utilização torna-se necessária para uma agricultura mais sustentável (Cardoso et al., 2019).

Portanto, a eficiência da adubação fosfatada depende de fatores relacionados às características do fertilizante, do solo e da resposta da planta, diretamente influenciada pela quantidade de fertilizante aplicado. Assim, a determinação da dose do adubo é fundamental para se alcançar a eficiência desejada e a produção esperada.

Diante disso, objetivou-se avaliar o acúmulo de macronutrientes na planta e nas sementes de alface submetidas a diferentes doses de termofosfato e superfosfato triplo aplicados no plantio.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida na Fazenda Experimental da Universidade Estadual Paulista, localizada no município de São Manuel, São Paulo (22°46'04.9"S, 48°34'19.4"W e 709 m de altitude), no período de 29 de setembro de 2023 (semeadura) a 05 de fevereiro de 2024 (colheita das sementes). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é tropical do tipo Aw, com verão chuvoso e inverno seco (Franco *et al.*, 2023).

O experimento foi conduzido em ambiente protegido, em estufa do tipo arco, com pé direito de 2,5 m, coberta com filme de polietileno de alta densidade (150 µm) e laterais fechadas com tela antiafídica. As médias da temperatura máxima, média e mínima, umidade relativa (UR) e precipitação média diária para o período foram 30,3°C, 23,7°C, 18,9°C, 69,1% e 4,6 mm, respectivamente (Figura 1). Estes dados

referem-se ao ambiente externo ao ambiente protegido. As plantas foram conduzidas em vasos com capacidade para 8 L.

O solo utilizado foi classificado como latossolo vermelho distrófico típico, de textura arenosa (Santos *et al.*, 2018). Antes e após a condução do experimento, amostras de solo foram coletadas e enviadas para o Departamento de Ciência Florestal, Solos e Ambiente da FCA/UNESP, campus de Botucatu-SP, para a análise química. A correção do solo foi realizada com base na análise para elevar a saturação por bases a 80%, seguindo a recomendação de Trani *et al.* (2022). O solo apresentava baixo teor de fósforo (13 mg dm^{-3}) antes da instalação da pesquisa, passando para médio (48 e 57 mg dm^{-3}) e muito alto (130 e 157 mg dm^{-3}) ao final do experimento, com as doses 320 e 800 kg ha^{-1} de P_2O_5 , respectivamente (Tabela 1).

Figura 1- Dados climatológicos da Fazenda Experimental de São Manuel no período de condução do experimento

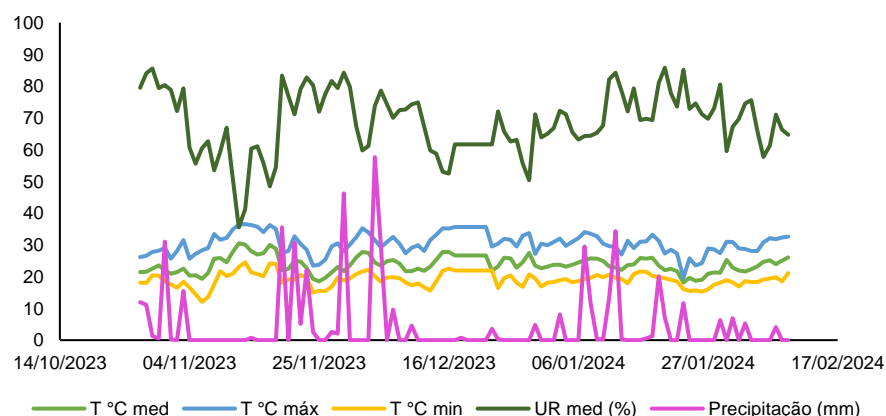


Tabela 1- Análise do solo antes e após a condução da pesquisa

Fonte	pH(CaCl ₂)	M.O.	P _{res}	H+Al	SB	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CTC	V	Cu	Fe	Mn	Zn	B
		g dm ⁻³	mg dm ⁻³			mmolc dm ⁻³				%					
Antes da calagem	4,6	2	13	18	27	1,1	20	6	45	59	1,0	8	5,6	0,7	0,19
Antes do plantio	5,8	6	13	12	50	1,3	36	12	62	80	-	-	-	-	-
Após a colheita															
Fonte	Dose (kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅)														
Orgânico	320	6,5	7	48	11	71	0,7	52	18	82	86	-	-	-	-
	800	6,8	10	157	9	90	2,0	60	28	98	91	-	-	-	-
Convencional	320	7,0	7,0	57	8	61	1,1	46	14	68	89	-	-	-	-
	800	5,6	6,0	130	16	58	4,4	38	16	74	78	-	-	-	-

Foram estudados quatro tratamentos dispostos em delineamento de blocos ao acaso, em um fatorial 2 x 2, com duas doses de fósforo no plantio (320 e 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e duas fontes de fósforo (orgânica - termofosfato - e inorgânica - superfosfato triplo), com cinco repetições e uma planta por parcela. A dose 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅ é a dose recomendada por Trani *et al.* (2022) para o cultivo de alface para o mercado *in natura*, enquanto 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅ é a dose em que Kano *et al.* (2012) obtiveram a maior produtividade de sementes de alface.

As adubações antes do plantio com nitrogênio e potássio foram feitas com base na análise de solo e de acordo com as recomendações de Trani *et al.* (2022) para a produção de alface. Na adubação de plantio e de cobertura foram utilizadas a ureia e a torta de mamona como fonte de N, cloreto de potássio e sulfato de potássio como fonte de K, nos tratamentos inorgânico e orgânico, respectivamente.

A adubação de plantio correspondeu ao fornecimento de 0,16 g de N e 0,48 g de K₂O por vaso, correspondendo a 40 e 120 kg ha⁻¹ de N e de K₂O, respectivamente, além de 80 g por vaso (planta) de esterco de galinha como fonte de matéria orgânica, correspondendo a 20 t ha⁻¹ de esterco de galinha. Na Tabela 2 estão os resultados das análises químicas do termofosfato e dos adubos orgânicos utilizados, que foram feitas conforme o Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos (MAPA, 2017).

Tabela 2- Resultados da análise química dos adubos orgânicos termofosfato (T), torta de mamona (TM) e esterco de galinha (EG)

Fontes	N	P ₂ O ₅ Total	P ₂ O ₅ Ac***	K ₂ O	S	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	Relação C/N
----- % (ao natural) -----				-----mg/kg(ao natural)-----								
TY	-	18	17	ND**	ND	-	-	-	-	-	-	-
TM	5,38	1,10	-	0,73	0,16	0,84	0,41	33	1501	101	114	8/1
EG	1,15	1,30	-	1,57	0,20	1,14	0,47	150	9790	324	137	-

*Teores totais; **Não detectado; *** solúvel em ácido cítrico.

A adubação fosfatada de plantio foi feita aplicando-se superfosfato triplo ou termofosfato em quantidades suficientes para fornecer 3,2 e 1,28 g por planta de P₂O₅, correspondente as doses de 800 e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente.

Considerando-se que o esterco de galinha e a torta de mamona tem fósforo em sua composição, as doses aplicadas antes do plantio foram superiores ao descrito

nos tratamentos. No entanto, como não se pode ter certeza de que este fósforo estará disponível às plantas e foi igual para todas as plantas, considerou-se como tratamento as doses fornecidas com o termofosfato e com o superfosfato triplo.

As mudas da cultivar Solaris foram feitas em bandejas com 200 células contendo substrato Carolina e foram transplantadas no dia 27 de outubro de 2023 em vasos com capacidade para 8L de solo. Os vasos foram dispostos a uma distância 1,0 m entre linhas e 0,5 m entre plantas.

Na adubação em cobertura, N, P₂O₅ e K₂O foram fornecidos nas quantidades de 0,18, 0,06 e 0,12 g por planta, respectivamente, semanalmente, iniciando-se aos 7 dias após o transplante (DAT), até uma semana anterior a colheita das sementes. No tratamento com adubos inorgânicos foram utilizados a ureia, o MAP e o cloreto de potássio, no orgânico a torta de mamona, o termofosfato e o sulfato de potássio, respectivamente. Na Tabela 3 tem-se a quantidade de macronutrientes potencialmente fornecidos por hectare antes do plantio, em cobertura e total nos tratamentos com adubos orgânicos e inorgânicos considerando-se todos os adubos utilizados ao longo do ciclo.

Tabela 3- Quantidade de macronutrientes potencialmente fornecidos por ha antes do plantio, em cobertura e total nos tratamentos com adubos orgânicos e inorgânicos

Tratamento	N	K ₂ O	P ₂ O ₅	Ca	Mg	S
kg ha ⁻¹						
Antes do plantio*						
Org320	270	439,4	589,0	234,2	97,3	77,2
Org800	270	439,4	1069,0	234,2	97,3	77,2
Inorg320	270	434,0	580,0	228,0	94,0	40,0
Inorg800	270	434,0	1060,0	316,0	94,0	40,0
Em cobertura						
Org320	630	420	210	60,0	30,0	126,0
Org800	630	420	210	60,0	30,0	126,0
Inorg320	630	420	210	-	-	-
Inorg800	630	420	210	-	-	-
Total						
Org320	900	859,4	799,0	294,2	127,3	203,2

Org800	900	859,4	1279,0	294,2	127,3	203,2
Inorg320	900	854,0	790,0	228,0	94,0	40,0
Inorg800	900	854,0	1270,0	316,0	94,0	40,0

* Considerando-se o esterco de galinha que foi igual para todos.

Org320 = tratamento com adubos orgânicos e aplicação de 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅, antes do plantio.

Org800 = tratamento com adubos orgânicos e aplicação de 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅, antes do plantio.

Inorg320 = tratamento com adubos inorgânicos e aplicação de 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅, antes do plantio.

Inorg800 = tratamento com adubos inorgânicos e aplicação de 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅, antes do plantio.

A irrigação foi feita de forma localizada com uso de fitas gotejadoras, sendo o fornecimento de água parcelado em três aplicações diárias. O controle de plantas espontâneas foi feito de forma manual.

Aos 98 DAT as plantas foram coletadas, de forma manual mediante corte na base do caule, rente ao solo, e separadas as folhas, caule, hastes florais e sementes. As sementes foram extraídas friccionando-se as inflorescências na superfície de uma peneira. Após a extração, as sementes foram passadas no aparelho separador de sementes por densidade (modelo 'De Leo Tipo 1'), conforme Bezerra *et al.* (2023).

Cada parte foi embalada separadamente em saco de papel e posta para secagem em estufa com circulação de ar forçada a 65±5 °C até a obtenção de massa constante. As amostras secas foram moídas em moinho de aço inoxidável, tipo Willey, armazenadas em sacos de papel e encaminhadas para o laboratório de análises de plantas do Departamento de Ciência Florestal, Solos e Ambiente da FCA/UNESP para a determinação dos teores de macronutrientes na parte vegetativa (folhas e caule) e reprodutiva (sementes e hastes florais). A metodologia para as análises dos nutrientes foi de acordo com descrito em Malavolta, Vitti e Oliveira (1997), utilizando-se a digestão sulfúrica para a determinação de nitrogênio e digestão nítrico-perclórica para fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre. Os resultados foram obtidos em g kg⁻¹ de matéria seca e foram utilizados no cálculo para obtenção do acúmulo de macronutrientes. As quantidades de nutrientes acumulados foram obtidas pela proporcionalidade do teor de cada nutriente pela massa da matéria seca da amostra e os dados foram expressos em mg planta⁻¹.

Os dados foram submetidos a análise de variância e a comparação entre as doses e os tipos de manejo foi feita utilizando o teste F ao nível de 5% de probabilidade; e quando identificado interação entre os fatores, a comparação foi feita utilizando o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, utilizando o Software Sisvar (Ferreira, 2011).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve diferença significativa entre as doses de P_2O_5 para o acúmulo de massa seca de folhas, de caule, e massa seca da parte vegetativa (folhas + caule), com a dose de 800 kg ha^{-1} superior à dose de 320 kg ha^{-1} em torno de 27,0%, 37,3% e 30,1%, respectivamente. O fósforo exerce efeito direto sobre o crescimento vegetativo das plantas, sendo esse efeito observado também sobre a produção de sementes (Kano et al., 2012; Cardoso et al., 2016; Sá et al., 2025). Dessa forma, a sua disponibilidade é determinante para o acúmulo de biomassa, possivelmente por favorecer o desenvolvimento radicular e a eficiência fotossintética, processos fortemente dependentes de energia e, portanto, de ATP (Taiz et al., 2017).

A ausência de diferença significativa entre os sistemas de manejo para o acúmulo de massa seca nas folhas, caule, parte vegetativa (folha + caule) e sementes (Tabela 4) indica que, nessa fase, a fonte de nutrientes (orgânica ou mineral) atendeu de forma semelhante à demanda da planta. Kopczyńska et al. (2020), ao avaliarem a produtividade de cultivares de abobrinha em diferentes sistemas de cultivo, não observaram diferença significativa no acúmulo de matéria seca dos frutos entre os sistemas convencional e orgânico.

Houve interação significativa entre as doses de fósforo (800 e 320 kg ha^{-1} de P_2O_5) e os sistemas de manejo (orgânico e convencional) para a massa seca total da planta e da parte reprodutiva. Analisando as doses de fósforo dentro de cada sistema de manejo, houve maior acúmulo de massa seca total na dose de 800 kg ha^{-1} de P_2O_5 com incrementos de aproximadamente 13,6% e 28,4% no manejo orgânico e convencional, respectivamente, em relação a dose de 320 kg ha^{-1} de P_2O_5 (Tabela 5). Por outro lado, comparando os sistemas de manejo dentro de cada uma das doses estudadas (Tabela 5) verificou-se diferença significativa entre os manejos apenas na dose de 320 kg ha^{-1} , na qual o sistema orgânico proporcionou acúmulo de massa seca total em torno de 14,6% maior do que no manejo convencional.

Para a massa seca total da parte reprodutiva, dentro de cada manejo, houve diferença significativa entre as doses apenas no manejo convencional, com a dose de 800 kg ha^{-1} superior a dose de 320 kg ha^{-1} em 3,9%. De forma semelhante, avaliando os manejos dentro de cada dose, observou-se que na dose de 320 kg ha^{-1} o manejo orgânico foi superior ao manejo convencional em cerca de 15,0%, enquanto que na dose de 800 kg ha^{-1} não houve diferença entre os sistemas de manejo.

No manejo orgânico a liberação gradual dos nutrientes pode ter favorecido o aproveitamento pelas plantas mesmo na menor dose de fósforo e, conseqüentemente, o acúmulo de massa seca. De acordo com Zhang et al. (2024) e Wang et al. (2023), em níveis elevados de fertilizantes a disponibilidade de nutrientes não se mostra limitante, de modo que tanto o manejo orgânico quanto o convencional fornecem quantidades adequadas de fósforo e outros nutrientes. Por outro lado, em condições de menor disponibilidade de nutrientes no solo, o fósforo pode se tornar limitante, possivelmente devido à sua fixação no solo, efeito que tende a ser mais pronunciado quando se utilizam fontes de elevada solubilidade em água (Lima, 2020).

Tabela 4- Valores médios e percentuais (em relação a massa seca total) da massa seca das folhas (MSF), caule (MSC), parte vegetativa (MSPV) e sementes (MSS), em resposta as doses de fósforo e dois tipos de manejo (orgânico e convencional) aos 98 dias após o transplante

Dose	MSF	%	MSC	%	MSPV (folha+caule)	%	MSS	%
(kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅)	(g planta ⁻¹)		(g planta ⁻¹)		(g planta ⁻¹)		(g planta ⁻¹)	
800	42,2 a*	**33,8	35,7a	28,6	77,9a	62,4	8,9a	7,1
320	33,3 b	32,1	26,0b	25,7	59,9b	57,8	8,3a	8,0
Manejo								
Orgânico	38,6 a	32,7	33,4a	28,3	72,0a	60,9	8,7a	7,4
Convencional	37,0 a	33,5	29,0a	26,3	66,0a	59,8	8,4a	7,6

*Médias seguidas pelas mesmas letras minúscula nas colunas não diferem entre si pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade. ** porcentagem acumulada nas partes da planta em relação ao total na planta.

Tabela 5- Valores médios da massa seca total da planta (MST), da parte reprodutiva com as sementes (MST-PR) e percentuais em relação a massa seca total (%) em resposta as doses de fósforo e dois tipos de manejo (orgânico e convencional) aos 98 dias após o transplante

Manejo	MST (g planta ⁻¹)		MST-PR (g planta ⁻¹)			
	800	320	800	%	320	%
Orgânico	125,8 Aa	110,7Ba	45,7Aa	36,3	46,7Aa	42,2
Convencional	124,1 Aa	96,6Bb	48,2Aa	38,3	40,6 Bb	42,0

*Médias seguidas pelas mesmas letras, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

** Porcentagem acumulada nas partes da planta em relação ao total na planta.

Para o acúmulo de macronutrientes nas sementes de alface, foi observada interação significativa entre as doses (800 e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e os sistemas de manejo (orgânico e convencional) apenas para o nitrogênio. Na comparação entre as doses dentro de cada manejo, constatou-se que, no sistema orgânico, o acúmulo de nitrogênio não diferiu entre as doses, enquanto no sistema convencional a aplicação de 800 kg ha⁻¹ resultou em maior acúmulo em relação à dose de 320 kg ha⁻¹, correspondendo ao maior valor observado. Por outro lado, ao comparar os sistemas de manejo dentro de cada dose, verificou-se um maior acúmulo de nitrogênio no manejo convencional em relação ao orgânico em ambas as doses de fósforo avaliadas (Tabela 6).

Tabela 6- Valor médio de nitrogênio acumulado nas sementes de alface sob manejo orgânico e convencional da adubação fosfatada com dose de 800 e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅ aos 98 dias após o transplante e percentual em relação ao acúmulo total de nitrogênio na planta

Manejo	Doses (kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅)			
	320	%	800	%
	mg planta ⁻¹		mg planta ⁻¹	
Orgânico	572,9 bA*	33,0**	528,1 bA	34,0
Convencional	671,2 aB	35,0	801,0 aA	35,0

*Médias seguidas pelas mesmas letras, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade. ** porcentagem acumulada na semente em relação ao total na planta.

Houve diferença significativa entre as doses de P₂O₅ e entre os sistemas de manejo no acúmulo da maioria dos macronutrientes nas sementes de alface. De modo geral, a aplicação da dose de 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅ resultou em maiores valores acumulados dos macronutrientes avaliados, quando comparada à dose de 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Os incrementos observados foram de aproximadamente 13,9% para o fósforo (P), 23,0% para o potássio (K), 18,9% para o cálcio (Ca), 5,8% para o magnésio (Mg) e 12,0% para o enxofre (S) em relação a menor dose estudada (Tabela 7).

Em relação aos sistemas de manejo, houve maior acúmulo de P no manejo convencional (15,9% em relação ao manejo orgânico). Por outro lado, maior acúmulo

de K e Ca foi observado no manejo orgânico em relação ao convencional, com valores superiores em torno de 4,8% e 5,4%, respectivamente. Para o Mg e o S, não foi observada diferença significativa entre os sistemas (Tabela 7).

Nas sementes, independente da dose de fósforo ou do sistema de manejo, o acúmulo de macronutrientes em ordem decrescente de valores foi N>K>P>Ca>Mg>S (Tabela 6 e 7). Bezerra *et al.* (2023) encontraram a seguinte ordem decrescente de acúmulo nas sementes de alface: N>K>P>Ca>Mg>S. Quadros *et al.* (2010) observaram que a ordem decrescente de acúmulo de macronutrientes em sementes de alface foi: N>P>K>Ca>Mg>S, enquanto Kano (2006) observou a seguinte ordem de acúmulo de macronutrientes em sementes de alface: N>P>K > Mg>Ca>S.

Tabela 7- Valores médios para o acúmulo de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) nas sementes de alface em função de doses (800 e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e fontes de fósforo (orgânico e convencional) e percentual em relação ao acúmulo total do nutriente na planta

Nutriente	Doses de P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)			
	800		320	
	mg planta ⁻¹	% do total**	mg planta ⁻¹	% do total
P	131,0 A	33,1	115,0 B	38,9
K	300,0 A	10,6	243,9 B	10,4
Ca	118,0 A	6,9	99,2 B	5,8
Mg	76,2 A	19,4	72,0 B	18,9
S	46,4, A	23,0	41,4 B	25,1

	Fonte			
	Orgânico		Convencional	
	mg planta ⁻¹	% do total	mg planta ⁻¹	% do total
P	113,9 B	40,2	132,0 A	32,3
K	278,4 A	10,0	265,5 B	11,2
Ca	111,6 A	7,8	105,6 B	6,4
Mg	73,3 A	18,9	74,9 A	19,4
S	45,4 A	23,7	42,4 A	24,3

*Médias seguidas pelas mesmas letras nas linhas, não diferem entre si pelo teste F a nível de 5% de probabilidade.

** porcentagem acumulada na semente em relação ao total acumulado na planta

Em todas as pesquisas mencionadas com sementes de alface, os nutrientes N, K e P aparecem como os mais acumulados na semente. De acordo com Cardoso *et al.* (2016), o acúmulo de nitrogênio, quando comparado a outros macronutrientes,

tende a ser maior devido à sua importância na formação das sementes (principalmente proteínas), além de ter fácil mobilidade na planta, assim como o potássio, o segundo nutriente com maior acúmulo na semente. O fósforo é acumulado na semente na forma de fitina, sendo importante na germinação após passar pela ação da enzima fitase (Carvalho; Nakagawa, 2012).

Destacam-se as elevadas taxas dos nutrientes N e P nas sementes, pois embora os propágulos representem de 7,1 a 8,0% da massa seca total da planta ao final do ciclo (Tabela 4), foram acumulados de 33,0 a 35,0% de N (Tabela 6) e de 32,3 a 40,2% do P (Tabela 7) do total, apenas nas sementes, mostrando a importância destes nutrientes na fase reprodutiva. O acúmulo de fósforo nas sementes é superior ao de qualquer outra parte da planta, facilitado pela grande mobilidade do P, que é redistribuído das folhas para as partes reprodutivas (Malavolta, 2006; Cardoso, 2011). Também se destacou o acúmulo de S com cerca de 23,0 a 25,1%. O enxofre desempenha um papel essencial na formação de aminoácidos e proteínas, além de ser crucial para processos como a fotossíntese e a resistência ao frio (Taiz *et al.*, 2017). Considerando-se que as sementes são ricas em proteínas (Carvalho; Nakagawa, 2012), justifica-se as elevadas taxas de acúmulo de N e S nas sementes comparativamente às partes vegetativas da planta.

O cálcio foi o nutriente acumulado em menor taxa nas sementes, apenas 7% em média do total da planta, pois não é translocado das folhas para as sementes, acumulando-se nas folhas que apresentam elevada taxa transpiratória, comparada às sementes (Kano, 2006). Portanto, é essencial que este nutriente esteja disponível no solo ao longo de todo ciclo, que a irrigação seja realizada com a quantidade de água adequada até o final do ciclo e que não ocorra desbalanço com outros cátions, como o K^+ e o Mg^{++} .

Houve interação significativa entre as doses de P_2O_5 (800 e 320 kg ha⁻¹) e os sistemas de manejo (orgânico ou convencional) no acúmulo de macronutrientes na parte vegetativa (Tabela 8) e na parte reprodutiva (Tabela 9) das plantas de alface aos 98 DAT. Na parte vegetativa, ao comparar as doses dentro de cada manejo, verificou-se que, no sistema orgânico, a dose de 320 kg ha⁻¹ promoveu acúmulo de nitrogênio significativamente maior do que na dose 800 kg ha⁻¹, em torno de 28%. Por outro lado, a dose de 800 kg ha⁻¹ resultou em acúmulos significativamente maiores de fósforo e cálcio, com valores superiores em torno de 45,4% e 20,6% em relação a dose de 320 kg ha⁻¹, respectivamente. Já no sistema convencional, a dose de 800 kg

ha⁻¹ apresentou maiores acúmulos de fósforo, potássio e enxofre, com valores significativamente superior a dose de 320 kg ha⁻¹ em torno de 79,6%, 22,9% e 29,6%, respectivamente (Tabela 9).

Ao analisar os sistemas de manejo em cada dose estudada, observou-se que, na dose de 320 kg ha⁻¹, o manejo orgânico apresentou valores de acúmulo de potássio e enxofre em torno de 48,0% e 26,0% maior do que o manejo convencional. Enquanto este, por outro lado, foi superior no acúmulo de fósforo e cálcio, com valores significativamente superior ao orgânico em 26,2% e 24,2% (Tabela 8). Na dose de 800 kg ha⁻¹, no manejo orgânico em relação ao convencional, destaca-se um maior acúmulo de potássio (1826 mg planta⁻¹) e magnésio (296,1 mg planta⁻¹), com valores superiores em torno de 12,7% e 22,8%, respectivamente; e no manejo convencional em relação ao orgânico, o nitrogênio (1074,4 mg planta⁻¹) e fósforo (292,8 mg planta⁻¹), com valores superiores em torno de 34,0% e 98,9%, respectivamente (Tabela 8).

Em termos percentuais em relação ao total acumulado, destacam-se o cálcio (Ca) e o magnésio (Mg) com taxas de 71,5 a 76,8% (Ca) e de 65,0 a 71,2% (Mg) na parte vegetativa, provavelmente por serem elementos com baixa translocação da parte vegetativa para as sementes (Taiz *et al.*, 2017).

Na dose de 800 kg ha⁻¹, no manejo orgânico, a ordem decrescente de acúmulo de macronutrientes na parte vegetativa total (folhas + caule) nas plantas de alface ao final do ciclo foi K>Ca>N>Mg>P>S, enquanto na dose 320 kg ha⁻¹ foi K > N > Ca > Mg > P > S (Tabela 8). No estudo de Kano *et al.* (2011) sobre plantas de alface destinadas à produção de sementes, foi observada a seguinte ordem de acúmulo de macronutrientes na planta: K > N > Ca > Mg > P > S, semelhante ao observado nesse estudo com a dose de 320 kg ha⁻¹.

Na dose de 800 kg ha⁻¹, no manejo convencional, a ordem decrescente de acúmulo de macronutrientes na parte vegetativa total (folhas +caule) nas plantas de alface ao final do ciclo foi K>Ca>N>P>Mg>S (Tabela 8). Essa sequência difere da ordem comumente observada em plantas para consumo *in natura*, na qual o nitrogênio normalmente é mais acumulado em relação ao cálcio, como observado em estudos de acúmulo de nutrientes em alface por Kano *et al.* (2012), Tamelini *et al.* (2024); Lima *et al.* (2020) observaram a seguinte ordem de acúmulo na planta: K>N>Ca>P>Mg>S.

Tabela 8- Valores médios para o acúmulo de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre na parte vegetativa (caule + folhas) e percentual em relação ao acúmulo total na planta, de plantas de alface em função de doses (800 e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e fontes de fósforo (orgânica e convencional)

Fonte	Nitrogênio (mg planta ⁻¹)				Fósforo (mg planta ⁻¹)				Potássio (mg planta ⁻¹)			
	Doses (kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅)											
	320	%	800	%	320	%	800	%	320	%	800	%
Orgânico	1023,5aA*	**58,7	800,2 bB	52,4	129,1 bB	50,0	147,2 bA	47,8	1872,6 aA	70,3	1826 aB	62,5
Convencional	1002,7 bB	52,0	1074,4 aA	47,5	163,0 aB	48,9b	292,8 aA	60,6	1265,2 bB	62,7	1555,2 bA	57,1
	Cálcio (mg planta ⁻¹)				Magnésio (mg planta ⁻¹)				Enxofre (mg planta ⁻¹)			
Orgânico	876,2 bB	72,4	1274 bA	76,8	245,4 bB	68,4	296,1 aA	71,2	103,5 aB	55,8	106,4 aA	53,9
Convencional	1094,6 aB	71,5	1276,5 aA	72,5	275,7 aA	68,8	241,1 bB	65,0	82,3 bB	57,1	106,7 aA	51,9

*Médias seguidas pelas mesmas letras, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade. ** porcentagem acumulada na parte vegetativa em relação ao total na planta.

Na parte reprodutiva, ao comparar as doses dentro de cada manejo, verificou-se que nos dois sistemas (orgânico e convencional), a dose de 800 kg ha⁻¹ promoveu maiores acúmulos de N, P, K, Ca, Mg e S. Para o acúmulo de N, verificou-se incremento de 22% no manejo convencional e de 1% no manejo orgânico em relação à dose de 320 kg ha⁻¹. Com relação ao potássio, a elevação da dose para 800 kg ha⁻¹ resultou em aumentos de aproximadamente 36% no manejo convencional e 28% no manejo orgânico, na parte reprodutiva (Tabela 9). Esse incremento no acúmulo de potássio é consistente com a função fisiológica desse nutriente no metabolismo vegetal. O K desempenha papel fundamental no transporte de fotoassimilados pelo floema, na ativação enzimática e na regulação osmótica, sendo, portanto, fortemente demandado durante a fase reprodutiva (Taiz *et al.*, 2017). Quando o fósforo deixa de atuar como fator limitante ao crescimento, ocorre intensificação da atividade metabólica e da produção de assimilados, o que eleva a exigência por potássio para garantir o eficiente translocamento desses compostos aos órgãos reprodutivos (Marschner, 2012; Malavolta, 2006).

A análise dos sistemas de manejo dentro de cada dose avaliada indicou que com a aplicação de 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅, o manejo convencional apresentou maiores acúmulos de N (906,6 mg planta⁻¹), P (170,4 mg planta⁻¹), Ca (435,5 mg planta⁻¹) e Mg (124,9 mg planta⁻¹), enquanto o manejo orgânico foi superior ao convencional no acúmulo de K (791,4 mg planta⁻¹) e S (82,0 mg planta⁻¹) entorno de 5,0 % e 24,0%, respectivamente. Na dose de 800 kg ha⁻¹, o manejo convencional manteve-se superior ao orgânico no acúmulo de N, P e Ca em 38%, 15% e 20%, respectivamente, e K, Mg e S entorno de 6 a 8% (Tabela 9).

O maior acúmulo de nutrientes no manejo convencional pode ser atribuído à maior disponibilidade imediata desses nutrientes no solo. A absorção de N e P, em particular, está diretamente relacionada à concentração desses elementos na solução do solo, enquanto o acúmulo de Ca e Mg depende do fluxo transpiratório e da disponibilidade contínua, condições favorecidas pela adubação mineral (Barber, 1995; Malavolta, 2006; Marschner, 2012). Em contrapartida, o maior acúmulo de enxofre observado no manejo orgânico na menor dose pode ser atribuído à mineralização gradual das formas orgânicas desse nutriente, processo que acompanha a dinâmica do carbono no solo. Essa liberação progressiva tende a favorecer a disponibilidade e

a absorção de S em sistemas orgânicos, sobretudo em condições de menor aporte de fertilizantes minerais (Tabatabai, 1982; Stevenson, 1994; Malavolta, 2006)

Tabela 9- Valores médios para o acúmulo de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre na parte reprodutiva (outras + sementes), e percentual em relação ao acúmulo total na planta, de plantas de alface em função de doses (800 e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e fontes de fósforo (orgânica e convencional)

Fonte	Nitrogênio (mg planta ⁻¹)				Fósforo (mg planta ⁻¹)				Potássio (mg planta ⁻¹)			
	Doses (kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅)											
	320	%	800	%	320	%	800	%	320	%	800	%
Orgânico	719,6 bB*	**41,3	727,5 bA	47,6	129,1 bB	50,0	160,8 bA	52,2	791,4 aB	29,7	1096,5 bA	37,5
Convencional	926,6 aB	48,0	1189,3 aA	52,5	170,4 aB	51,1	190,7 aA	39,4	752,3 bB	37,3	1170,0 aA	42,9
	Cálcio (mg planta ⁻¹)				Magnésio (mg planta ⁻¹)				Enxofre (mg planta ⁻¹)			
Orgânico	333,9 bB	27,6	385 bA	23,2	113,5 bB	31,6	119,7 bA	28,8	82,0 aB	44,2	91,1 bA	46,1
Convencional	435,5 aB	28,5	483,6 aA	27,5	124,9 aB	31,2	129,8 aA	35,0	61,8 bB	42,9	99,0 aA	48,1

*Médias seguidas pelas mesmas letras, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade. ** porcentagem acumulada na parte reprodutiva em relação ao total na planta.

Foi observada interação significativa entre as doses de P_2O_5 e os sistemas de manejos no acúmulo total de macronutrientes em plantas de alface (Tabela 10). Ao comparar as doses de P_2O_5 dentro de cada sistema de manejo, verificou-se que, no sistema convencional, a aplicação de 800 kg ha^{-1} de P_2O_5 resultou em maiores acúmulos de N (14,7%), P (31%), K (26%), Ca (13%) e S (30%) em relação à dose de 320 kg ha^{-1} , enquanto o magnésio apresentou incremento (entorno de 7%) na menor dose. No sistema orgânico, a dose de 800 kg ha^{-1} promoveu aumento no acúmulo de P (16,1%), K (8,8%), Ca (27,0%), Mg (13,6%) e S (6,0%) em relação à dose de 320 kg ha^{-1} ; entretanto, o acúmulo de nitrogênio foi maior, em relação a dose de 800 kg ha^{-1} , entorno de 12,0% nesse sistema (Tabela 10).

As diferenças observadas entre os sistemas de manejo refletem, principalmente, a dinâmica de disponibilização dos nutrientes no solo. O manejo convencional apresentou maior resposta ao incremento da dose de P_2O_5 , especialmente para o acúmulo de N e P, o que pode ser atribuído ao uso de fontes minerais de elevada solubilidade e rápida disponibilidade. Por outro lado, no sistema orgânico, a disponibilidade de nutrientes está condicionada, em grande parte, aos processos de mineralização da matéria orgânica, os quais ocorrem de forma gradual e dependem de fatores ambientais e biológicos. Dessa forma, mesmo com o aumento da dose de P_2O_5 , a liberação dos nutrientes pode não coincidir temporalmente com o pico de exigência da cultura, resultando em menor resposta relativa no acúmulo nutricional (Marschner, 2012).

A análise dos sistemas de manejo em cada dose avaliada indicou que, na dose de 320 kg ha^{-1} de P_2O_5 , o manejo convencional apresentou maiores acúmulos de N ($1929,3 \text{ mg planta}^{-1}$), P ($333,4 \text{ mg planta}^{-1}$), Ca ($1530,1 \text{ mg planta}^{-1}$) e Mg ($400,6 \text{ mg planta}^{-1}$), com valores superiores ao orgânico entorno de 9,6%, 22,5%, 20,9% e 10,2, respectivamente. Por outro lado, o manejo orgânico foi superior ao convencional no acúmulo de K ($2664,0 \text{ mg planta}^{-1}$) e S ($185,5 \text{ mg planta}^{-1}$), entorno de 24,0% e 22,3%, respectivamente na mesma dose. Na dose de 800 kg ha^{-1} , o manejo convencional foi superior ao orgânico no acúmulo de N, P, Ca e S entorno de 32,5%, 36,3% e 5,7%, respectivamente (Tabela 10).

Sá et al. (2025) avaliando a curva de crescimento de alface para a produção de sementes em sistema orgânico com duas doses de fósforo no plantio, observaram que o aumento da dose de fósforo para 800 kg ha^{-1} resultou em maior acúmulo de macronutrientes na planta aos 98 dias após o transplante. Também Kano (2006), estudando doses de fósforo no acúmulo de nutrientes na produção de sementes de

alface, observaram que o acúmulo de macronutrientes foi crescente com o aumento das doses de fósforo de 0 a 800 kg ha⁻¹.

Tabela 10- Valores médios para o acúmulo total de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre em plantas de alface (vegetativo + reprodutivo), e percentual em relação ao acúmulo total na planta, em função de doses (800 e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e fontes de fósforo (orgânica e convencional)

Fonte	Nitrogênio (mg planta ⁻¹)				Fósforo (mg planta ⁻¹)				Potássio (mg planta ⁻¹)			
	Doses (kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅)											
	320	%	800	%	320	%	800	%	320	%	800	%
Orgânico	1743,1 bA*	**100,0	1527,7 bB	100,0	258,2 bB	100,0	308 bA	100	2664,0 aB	100,0	2922,5 aA	100,0
Convencional	1929,3 aB	100,0	2263,7 aA	100,0	333,4 aB	100,0	483,5 aA	100	2017,5 bB	100,0	2725,1 bA	100,0
	Cálcio (mg planta ⁻¹)				Magnésio (mg planta ⁻¹)				Enxofre (mg planta ⁻¹)			
Orgânico	1210,1 bB	100,0	1659,0 bA	100,0	358,9 bB	100,0	415,8 aA	100,0	185,5 aB	100,0	197,5 bA	100,0
Convencional	1530,1 aB	100,0	1760,1 aA	100,0	400,6 aA	100,0	370,9 bB	100,0	144,1 bB	100,0	205,7 aA	100,0

*Médias seguidas pelas mesmas letras, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade. ** porcentagem acumulada total na planta.

O potássio (K) destaca-se como o nutriente mais acumulado na planta, e o segundo mais acumulado na semente, refletindo seu papel crucial na regulação osmótica e no transporte de nutrientes, essenciais durante a fase de desenvolvimento e maturação das sementes (Malavolta, 2006). No entanto, destaca-se que o K se concentrou mais na parte vegetativa (57,1 a 70,3% - Tabela 8) apesar de ser facilmente translocável na planta, provavelmente por ser proporcionalmente mais importante na parte vegetativa e, portanto, pouco se concentra, percentualmente, nas sementes.

Apesar da concentração elevada de cálcio na planta, o acúmulo na semente foi baixo, o que pode ser consequência da baixa mobilidade desse nutriente na planta pelo floema, sendo seu transporte dependente do fluxo de água (Gilliam *et al.*, 2011; Nakada-Freitas *et al.*, 2021). Durante o ciclo reprodutivo voltado para a produção de sementes, há uma maior necessidade relativa de cálcio, comparado com o ciclo da alface para o consumo *in natura*, o que pode estar associado à sua função estrutural nas células e ao papel importante nas paredes celulares e membranas, especialmente na formação de estruturas reprodutivas.

4.4 CONCLUSÕES

Em média, a aplicação de 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅ promoveu o maior acúmulo de biomassa e nutrientes na alface.

O manejo convencional favoreceu a absorção de nitrogênio e fósforo, enquanto o manejo orgânico destacou-se para potássio e cálcio nas sementes.

Nas sementes, a sequência de acúmulo manteve-se constante (N > K > P > Ca > Mg > S) e aos 98 DAT as sementes representaram cerca de 8% da massa seca total, com 33% de N, 10% de K, 42% de P, 8% de Ca, 21% de Mg e 24% de S acumulados nessa parte.

REFERÊNCIAS

- BEZERRA, S. R. B.; MARQUES, I. B.; BARDIVIESSO, E. M.; PELVINE, R. A.; AGUILAR, A. S.; CARDOSO, A. I. I. Application of calcium and boron directed to inflorescences in production, quality and nutrient accumulation in lettuce seeds. **Horticultura Brasileira**, v. 41, n. 1, 2023, e2427.
- CARDOSO, A. I. I.; CLAUDIO, M. T. R.; NAKADA-FREITAS, P. G.; MAGRO, F. O.; TAVARES, A. E. B. Phosphate fertilization over the accumulation of macronutrients in cauliflower seed production. **Horticultura Brasileira**, v. 34, 2016, p. 196–201.
- CARDOSO, A. I. I.; SILVA, P. N. L.; COLOMBARI, L. F.; LANNA, N. B. L.; FERNANDES, D. M. Phosphorus sources associated with organic compound in broccoli production and soil chemical attributes. **Horticultura Brasileira**, v. 37, 2019, p. 228–233.
- CARDOSO, A. I. I. Nutrição e adubação em campos de produção de sementes de hortaliças. In: NASCIMENTO, W. M. (org.). **Hortaliças: tecnologia de produção de sementes**. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2011. p. 109–134.
- CARVALHO, N. M. de; NAKAGAWA, J. (ed.). **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. 5. ed. Jaboticabal: Funep, 2012. 590 p.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: A computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, 2011, p. 1039–1042.
- FRANCO, J. R.; DAL PAI, E.; CALÇA, M. V. C.; RANIERO, M. R.; DAL PAI, A.; SARNIGHAUSEN, V. C. R.; ROMÁN, R. M. S. Atualização da normal climatológica e classificação climática de Köppen para o município de Botucatu-SP. **Irriga**, v. 28, 2023, p. 77–92.
- GILLIHAM, M.; DAYOD, M.; HOCKING, B. J.; XU, B.; CONN, S. J.; KAISER, B. N.; TYERMAN, S. D. Calcium delivery and storage in plant leaves: exploring the link with water flow. *Journal of Experimental Botany*, v. 62, n. 7, 2011, p. 2233–2250.
- KANO, C.; CARDOSO, A. I. I.; BÔAS, R. L. V. Phosphorus rates on yield and quality of lettuce seeds. **Horticultura Brasileira**, v. 30, n. 4, 2012, p. 695–698.
- KANO, C.; CARDOSO, A. I. I.; HIGUTI, A. R. O.; VILLAS BÔAS, R. L. Doses de potássio na produção e qualidade de sementes de alface. **Horticultura Brasileira**, v. 24, 2006 p. 356–359.
- KANO, C.; CARDOSO, A. I. I.; VILLAS BÔAS, R. L. Acúmulo de nutrientes pela alface à produção de sementes. **Horticultura Brasileira**, v. 29, 2011, p. 70–77.
- KOPCZYŃSKA, K.; KAZIMIERCZAK, R.; ŚREDNICKA-TOBER, D.; SZAFIROWSKA, A.; BARAŃSKI, M.; REMBIAŁKOWSKA, E.; HALLMANN, E. The effect of organic vs. conventional cropping systems on the yield and chemical composition of three courgette cultivars. **Agronomy**, v. 10, n. 9, 2020, p. 1341.

LIMA, L. F. A. Micorrizas arbusculares e absorção de fósforo em função da capacidade de fixação de fósforo do solo e da competição com a microbiota. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 3, 2020, p. 1062–1079.

MAGRO, F. O.; SALATA, A. C.; CARDOSO, A. I. I.; FERNANDES, D. M. Composto orgânico na produção e qualidade de sementes de brócolis. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, 2010, p. 596–602.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251 p.

MALAVOLTA, E. **Manual of Plant Mineral Nutrition**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. Princípios, métodos e técnicas de avaliação do estado nutricional. In: MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. (org.). **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. p. 115–230.

MAPA. **Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos**. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: MAPA, 2017. 240 p.

MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants**. 3 ed. London: Academic Press, 2012. 651p

MARTINS, B. N. M.; JORGE, L. G.; COLOMBARI, L. F.; BARDIVIESSO, E. M.; NASSER, M. D.; SOUSA, M. C.; CARDOSO, A. I. I. Doses of sulfur at topdressing and organic compost supply at planting in the production, quality and content of macronutrients in lettuce seeds. **Bioscience Journal**, v. 38, 2022, e38063.

SÁ, J. M.; CARDOSO, A. I. I.; SEGUCHI, D. S.; ÁVILA, J.; CARVALHO, J. R.; SOUZA, E. P.; NAKADA-FREITAS, P. G. Growth curve and nutrient accumulation in lettuce for seed production under organic system. **Horticulturae**, v. 11, 2025, p. 707.

NAKADA-FREITAS, P. G.; SANTOS, J. T.; HIDALGO, G. F.; ANJOS, L. V. S.; SOUZA, E. P.; MARTINS, I. R.; CARDOSO, A. I. I.; BARDIVIESSO, E. M.; LANNA, N. B. L.; CATÃO, H. C. R. M.; HEINRICHS, R. Calcium in the production and quality of cauliflower seeds. **Research, Society and Development**, v. 10, 2021, e44710212763.

QUADROS, B. R.; MAGRO, F. O.; CORRÊA, C. V.; CARDOSO, A. I. I. **Revista Cultivando o Saber**, v. 3, n. 2, 2020, p. 106–115.

QUADROS, B. R.; CORRÊA, C. V.; CARDOSO, A. I. I. Influence of organic compost and phosphorus on lettuce seeds. **Semina**, v. 33, 2012, p. 2511–2518.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres, 1991. 343 p.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.;

OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018. 353 p.

STEVENSON, F. J. **Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions**. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, 1994. 512p.0

TABATABAI, M. A. Sulfur. In: A.L PAGE; R. H. MILLER; D. R. KEENEY (Org). **Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1982. p. 501-538.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p.

TAMELINI, B. R.; SOUZA, E. P. D.; ALVES, T. N.; CARDOSO, A. I. I. Sources and doses of phosphorus in the production of red-leaf lettuce in an organic farming system. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 67, 2024, p. e24230761.

TRANI, P. E.; RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; FIGUEIREDO, G. J. B. **Hortaliças**. In: CANTARELLA, H. et al. (org.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 2022. p. 339–424.

WANG, L.; WANG, J.; YUAN, J.; TANG, Z.; WANG, J.; ZHANG, Y. Long-term organic fertilization strengthens the soil phosphorus cycle and phosphorus availability by regulating the *pqqC*- and *phoD*- harboring bacterial communities. **Microbial Ecology**, v. 86, n. 4, 2023, p. 2716–2732.

ZHANG, J.; WEN, J.; ZHANG, T.; ZHANG, Y.; PENG, Z.; TANG, C.; WANG, Y.; SU, S.; ZHANG, N.; ZENG, X. Effects of five-year inorganic and organic fertilization on soil phosphorus availability and phosphorus resupply for plant P uptake during maize growth. **Agriculture**, v. 13, n. 4, 2023, p. 858.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Atualmente, a disponibilidade de sementes produzidas no sistema orgânico é um gargalo nesse sistema de produção e, na maioria das vezes, o produtor tem que usar sementes produzidas no sistema convencional pela indisponibilidade de “sementes orgânicas”. A “Lei de Orgânicos” (Lei 10.831/03) foi aprovada pelo Congresso Federal em 23 de dezembro de 2003, foi regulamentada pelo decreto 6323/07 e entrou em vigor em janeiro de 2011. A lei descreve as normas referentes à produção, tipificação, processamento, envase, distribuição, identificação e certificação da qualidade dos produtos orgânicos, sejam de origem animal ou vegetal. Quanto às sementes, o produtor deveria utilizar somente sementes produzidas no sistema orgânico. No entanto, na ausência destas, o produtor pode utilizar sementes produzidas no sistema convencional, sem tratamento químico. Na ausência destas, pode-se utilizar com tratamento químico, desde que “autorizado” pela entidade certificadora.

Se faltam pesquisas na área de produção de sementes de hortaliças no Brasil, na área de “sementes orgânicas” quase não se tem pesquisas, ainda mais em espécies em que o ciclo de produção para produção de sementes é muito maior que para o consumo “in natura” da hortaliça, como a alface. Como pode-se observar, se for utilizada uma adubação recomendada para a produção de alface “in natura” visando a produção de sementes, a produtividade será comprometida.

Também pode-se observar que independentemente da fonte de adubos utilizados (orgânico ou inorgânico), a planta de alface se desenvolve plenamente alcançando níveis de produtividade de sementes semelhantes, para a mesma dose de fósforo.

Novas pesquisas devem ser realizadas. Esta pesquisa foi feita com as plantas cultivadas em vaso. Porém, e no campo, como deve ser a adubação? Adubação verde pode ser uma boa alternativa? E fertirrigação com biofertilizantes, pode ser alternativa (neste caso a curva de absorção é fundamental para nortear a fertirrigação)? São todas dúvidas pertinentes e apenas com novas pesquisas a produção de sementes orgânicas pode vir a ser uma realidade em maior escala no Brasil. Este é apenas um trabalho que visa ajudar a obter algumas destas respostas, mas que mostrou que é

possível a produção de sementes no sistema orgânico com produtividade e qualidade fisiológica tão boa como a produzida no sistema convencional.

REFERÊNCIAS

- ABCSEM. **Manual Técnico para Cultivo de Hortaliças**. 3ª Ed. Campinas, SP: ABCSEM, 2015. 100p.
- CAO, L.; SHI, P. J.; LI, L.; CHEN, G. A new flexible sigmoidal growth model. **Symmetry**, v. 11, n. 2, 2019, p. 204.
- COSTA CP; SALA FC. Retrospectiva e tendência da alfacicultura brasileira. **Horticultura Brasileira**, v. 30, n. 2, 2012, p. 187-194.
- DEMARTELAERE, A. C. F.; PRESTON, H. A. F.; FEITOSA, S. DOS S.; PRESTON, W.; SILVA, R. M. DA; ROSADO, A. K. H. B.; MEDEIROS, D. C. DE; FERREIRA, M. DOS S.; RODRIGUES, A. L. DOS S.; BENJAMIM, R. F. A influência dos fatores climáticos sob as variedades de alface cultivadas no Rio Grande do Norte. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n.11, 2020, p90363–90378.
- IBGE. **Censo Agropecuário 2017**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 04 Nov de 2024.
- KANO, C.; CARDOSO, A. I. I.; BÔAS, R. L. V. Doses de fósforo na produção e qualidade de sementes de alface. **Horticultura Brasileira**, v. 30, 2012, p. 695-698.
- KIM, M. J. *et al.* Nutritional value, bioactive compounds and health benefits of lettuce (*Lactuca sativa* L.). **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 49, 2016, p. 19-34.
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 631p.
- MALDONADE, I. R.; MATTOS, L. M.; MORETTI, C. L. **Manual de boas práticas agrícolas na produção de alface**. Brasília: Embrapa, 2014. 44p.
- MAPA. **Cadastro Nacional de Produtores Orgânicos, 2023**. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/organicos/cadastro-nacional-produtores-organicos>. Acesso em 23 maio 2023
- NASCIMENTO, W. M.; VIDAL, M. C.; RESENDE, F. V. Produção de Sementes de Hortaliças em Sistema Orgânico. In: NASCIMENTO, W.M. **Hortaliças: tecnologia de produção de sementes**. Brasília: Embrapa Hortaliças. 2011, p. 61-75.
- PESSOA, H.P.; JUNIOR, R.M. **Folhosas: destaque no cenário nacional**. 2021. Disponível em: <https://revistacampoenegocios.com.br/folhosas-em-destaque-no-cenario-nacional/#:~:text=A%20%C3%A1rea%20ocupada%20por%20alface,Janeiro%2C%20Minas%20Gerais>. Acesso em: 04 Nov de 2024.
- QUADROS, B. R.; MAGRO, F. O.; CORRÊA, C. V.; CARDOSO, A. I. I. Acúmulo de nutrientes em sementes de alface em função de doses de composto orgânico com e sem adição de fósforo ao solo. **Revista Cultivando o Saber**. v. 3, n. 2, 2010, p. 106-115.

RODRIGUES, R.A.S. **Olericultura**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A. 2019. 224 p.

SILVA, N. A. M. **Seleções de modelos de regressão não lineares e aplicação do algoritmo saem na avaliação genética do crescimento de bovinos Nelore**. Tese (Doutorado em Zootecnia). Escola de Veterinária, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010, 60 p.