

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

LETÍCIA MARIA DA SILVA

**ADUBAÇÃO FOSFATADA EM PRÉ-PLANTIO DA ALFACE EM CANTEIROS:
PARÂMETROS PRODUTIVOS, MORFOLÓGICOS E QUALITATIVOS**

ALFENAS/MG

2025

LETÍCIA MARIA DA SILVA

**ADUBAÇÃO FOSFATADA EM PRÉ-PLANTIO DA ALFACE EM CANTEIROS:
PARÂMETROS PRODUTIVOS, MORFOLÓGICOS E QUALITATIVOS**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre Mestrado em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Gestão e Manejo de Recursos Naturais e Biodiversidades.

Orientador: Romero Francisco Vieira Carneiro

ALFENAS/MG

2025

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Central

Silva, Leticia Maria da.

Adubação fosfatada em pré-plantio de alface em canteiros : parâmetros produtivos, morfológicos e qualitativos / Leticia Maria da Silva. - Alfenas, MG, 2025.

52 f. : il. -

Orientador(a): Romero Francisco Vieira Carneiro.

Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal de Alfenas, Alfenas, MG, 2025.

Bibliografia.

1. Lactuca sativa. 2. Fertilização fosfatada. 3. Crescimento radicular. 4. Produtividade. 5. Efeito residual. I. Carneiro, Romero Francisco Vieira , orient. II. Título.

LETÍCIA MARIA DA SILVA

**ADUBAÇÃO FOSFATADA EM PRÉ-PLANTIO: PARÂMETROS PRODUTIVOS,
MORFOLÓGICOS E QUALITATIVOS**

O presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação da Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestrado em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Alfenas. Área de Concentração: Gestão e Manejo de Recursos Naturais e Biodiversidade.

Aprovada em: 21 de Agosto de 2025

Prof. Dr. Romero Francisco Vieira Carneiro
Universidade: Universidade Federal De Alfenas

Assinatura:

Prof. Dr. Rafael Brito de Moura
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Francisco José Cardoso
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

AGRADECIMENTOS

A Deus, meus familiares e todos colaboradores que tanto me ajudaram

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

"O Senhor é a minha luz e a minha salvação; de quem terei medo? O Senhor é a fortaleza da minha vida; a quem temerei?"

— Salmos 27:1

RESUMO

Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da adubação fosfatada realizada em pré-plantio, ou seja, no momento do preparo de canteiros, utilizando-se como fonte o termofosfato Yoorin Master®, sobre parâmetros produtivos, morfológicos e qualitativos da alface crespa cultivar ‘Vera’. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com quatro doses de P_2O_5 (0, 350, 700 e 1050 kg ha⁻¹) e cinco repetições. Foram analisados a produtividade, altura e diâmetro médio das cabeças, massa seca por planta (parte aérea e sistema radicular), relação parte aérea raiz; além de parâmetros morfológicos do sistema radicular (comprimento, diâmetro, volume e superfície radicular, tanto totais como por classes de diâmetros), e os parâmetros qualitativos sobre o produto colhido como teores de cinzas e de nitrato. A produtividade não foi significativamente afetada pelas doses de P aplicadas. As doses intermediárias, especialmente 350 kg P_2O_5 ha⁻¹, favoreceram a maioria dos parâmetros morfológicos radiculares, sobretudo em classes de diâmetros específicas. Os teores de cinzas e nitrato mantiveram-se em valores de limites recomendados. Doses excessivas ou muito baixas de adubação fosfatada resultaram em maiores acúmulos de nitrato. Conclui-se que a adubação fosfatada, não pode ser observada unicamente pela ótica da produtividade e biometria do produto colhido. A alteração que promove em parâmetros radiculares, pode estar associada a impactos qualitativos expressivos na qualidade do produto colhido como o teor de nitrato nas folhas. O estudo revela que a dose de 350 kg P_2O_5 ha⁻¹ de adubação fosfatada aplicada no preparo dos canteiros une o desempenho agrônômico à qualidade nutricional e, assim, contribui para a sustentabilidade ambiental do sistema de cultivo.

Palavras-chave: *Lactuca sativa*; fertilização fosfatada; crescimento radicular; produtividade; efeito residual.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the effects of pre-planting phosphate fertilization, i.e., during seedbed preparation, using Yoorin Master® thermophosphate as a source, on the productive, morphological, and qualitative parameters of crisp lettuce cultivar 'Vera'. The experiment was conducted in a completely randomized design, with four P_2O_5 rates (0, 350, 700, and 1050 kg ha^{-1}) and five replicates. Yield, average head height and diameter, fresh and dry mass per plant and root system, and shoot-to-root ratio were analyzed; in addition to morphological parameters of the root system (length, diameter, volume, and root surface a, both total and by diameter classes), and qualitative parameters on the harvested product, such as ash and nitrate contents. Productivity was not significantly affected by the applied P rates. Intermediate rates, especially 350 kg $P_2O_5 ha^{-1}$, favored most root morphological parameters, especially in specific diameter classes. Ash and nitrate contents remained within recommended limits. Excessive or very low rates of phosphate fertilizer resulted in greater nitrate accumulation. It is concluded that phosphate fertilization cannot be observed solely through the lens of productivity and biometrics of the harvested product. The changes it causes in root parameters may be associated with significant qualitative impacts on the quality of the harvested product, such as nitrate content in leaves. The study reveals that (kg $P_2O_5 ha^{-1}$) levels of phosphate fertilizer often recommended in seedbed preparation associate agronomic performance with nutritional quality and, thus, contribute to the environmental sustainability of this cropping system.

Keywords: *Lactuca sativa*; phosphorus fertilization; root growth; productivity; residual effect.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1- Local escolhido para experimento nas dependências do campus da Unifal-MG de Poços de Caldas-MG.....22
- Figura 2 - Canteiros pós plantio (doses de fósforo) na sobre a cultura da Alface tipo crespa cultivar vera, nas dependências do campus da Unifal-MG de Poços de Caldas-MG..... 24
- Figura 3 - Análise por componentes principais (PCA) sobre características de produtividade, crescimento vegetativo da cabeça, parâmetros do sistema radicular além da qualidade do produto colhido da cultura da alface cultivar vera, sobre influência de doses crescentes de adubação fosfatada aplicada em pré-plantio no município de Poços de Caldas..... 27
- Figura 4 - Produtividade da alface tipo crespa cultivar vera aos 42 dias de um cultivo inicial, cultivada em canteiros preparados com diferentes doses de adubação fosfatada no município de Poços de Caldas-MG..... 29
- Figura 6- Peso seco médio de raiz (g) (a) por planta (b) e relação parte aérea:raiz (c) da alface tipo crespa cultivar vera cultivada em canteiros preparados com diferentes doses de adubação fosfatada no município de Poços de Caldas-MG..... 32
- Figura 7- Concentração de nitrato em mg kg⁻¹, aos 42 dias pós-plantio, em folhas de alface crespa cultivar vera em função de diferentes doses de fósforo aplicadas no preparo inicial dos canteiros no município de Poços de Caldas..... 34
- Figura 8- Teores de resíduo mineral-cinzas (g/kg) nas folhas da alface tipo crespa cultivar vera, aos 42 dias pós plantio, sobre efeito de diferentes doses de adubação fosfatada aplicadas em pré-plantio no município de Poços de Caldas..... 36
- Figura 10- Comprimento radicular na classe de diâmetro de $1,5 < L \leq 2,0$ mm das raízes da alface tipo crespa cultivar vera aos 42 dias pós-plantio, sobre efeito de diferentes doses de adubação fosfatada aplicadas em pré-plantio no município de Poços de Caldas..... 38
- Figura 11- Comprimento radicular de raízes da alface tipo crespa cultivar Vera na classe de diâmetro de $2,0 < L \leq 2,5$ mm sobre efeito de diferentes doses de adubação fosfatada aplicadas em pré-plantio, aos 42 dias pós-plantio no município de Poços de Caldas..... 39
- Figura 13:- Área de superfície radicular em raízes de alface tipo crespa cultivar Vera na classe de diâmetro de $2,0 < SA \leq 2,5$ mm sobre efeito de diferentes doses de adubação fosfatada aplicadas em pré-plantio, aos 42 dias pós-plantio no município de Poços de Caldas... 41
- Figura 14- Volume radicular em raízes de alface tipo crespa cultivar Vera na classe de diâmetro de $1,5 < V \leq 2,0$ mm sobre efeito de diferentes doses de adubação fosfatada

aplicadas em pré-plantio, aos 42 dias pós-plantio no município de Poços de Caldas..... 42

Figura 15- Volume radicular em raízes de alface tipo crespa cultivar Vera na classe de diâmetro de $2,0 < V \leq 2,5$ mm sobre efeito de diferentes doses de adubação fosfatada aplicadas em pré-plantio, aos 42 dias pós-plantio no município de Poços de Caldas..... 43

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	11
2- REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 - A CULTURA DA ALFACE.....	13
2.2 - FÓSFORO PARA A PLANTA E FATORES QUE INTERFEREM NA SUA DISPONIBILIDADE.....	14
2.3 - ADUBAÇÃO FOSFATADA E IMPORTÂNCIA DO MANEJO SUSTENTÁVEL.....	16
2.4 - NITRATO.....	18
2.5 - IMPACTOS DA ADUBAÇÃO FOSFATADA E A RELAÇÃO COM O ACÚMULO DE NITRATO.....	19
3 - METODOLOGIA	21
3.1 - LOCAL E MATERIAL VEGETAL:.....	21
3.2 - ÁREA EXPERIMENTAL E PREPARO DOS CANTEIROS:.....	22
3.3 - TRATAMENTOS E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	22
3.5 - ADUBAÇÃO DE COBERTURA:.....	23
3.6 - AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO DAS PLANTAS:.....	24
3.7 - COLETA DE AMOSTRAS PARA ANÁLISES:.....	24
3.8 - ANÁLISES LABORATORIAIS:.....	24
3.9 - ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	25
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

Originária de regiões mediterrâneas, a alface (*Lactuca sativa*) possui uma história milenar. Há registros que datam seu consumo a cerca de 4500 a.C., no Egito antigo. Introduzida no Brasil por volta do século XVI pelos colonizadores portugueses, é considerada atualmente a mais importante hortaliça folhosa no mundo e a mais consumida em território brasileiro (Embrapa, 2023).

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017), a produção de alface no Brasil, no ano de 2017, foi de aproximadamente 671.509 toneladas, com valor de produção estimado em 1.204.557 reais. O estado de São Paulo foi o maior produtor, com cerca de 413.676 mil reais em valor de produção, seguido por Minas Gerais (120.692 reais) e Paraná (104.334 reais).

Em 2013, a produção global de alface foi estimada em 24,9 milhões de toneladas, com a China contribuindo com aproximadamente 13,5 milhões de toneladas. Embora o volume seja significativo, a maior parte da produção chinesa é voltada para o consumo interno. Espanha e Estados Unidos são os principais exportadores globais. Historicamente, a produção global era dominada pelos países da América do Norte e Europa Ocidental. Contudo, esse panorama sofreu mudanças importantes a partir do final do século XX, com a difusão da cultura para várias partes do mundo (LLOYD, 2013).

A alface é considerada uma hortaliça de ciclo curto e com alta demanda nutricional, especialmente no que diz respeito à fertilidade do solo ou do substrato de cultivo.. A falta ou inadequado manejo nutricional pode afetar diretamente o desempenho agrônômico da planta, levando a perdas significativas na produtividade (Gomes, 2024). Um nutriente de destaque e considerado o alicerce dos sistemas produtivos é o P (fósforo) que na cultura da alface é recomendado em “altas” dosagens para a garantia de produtividades economicamente viáveis e, além disso, para a obtenção de um produto de qualidade sobre o ponto de vista da comercialização.

Os teores disponíveis de P em solos tropicais são reconhecidamente baixos, devido à sua fixação intensa nas superfícies coloidais dos mesmos, o que faz o seu requerimento externo ser frequentemente elevado (Machado, 2021). Diante disso, parâmetros como peso fresco, matéria seca, altura da planta, número de folhas por planta, comprimento da folha, largura da folha e rendimento da alface são significativamente impactados pela aplicação de

fósforo (Allahi *et al* 2014).

Estudos como o de Mantovani *et al.*, (2014) corroboram com a importância da adubação fosfatada para a manutenção de níveis elevados de P no solo para o cultivo da alface, o que, por sua vez, reflete positivamente na velocidade de crescimento e produtividade da cultura, e assim foi possível observar respostas favoráveis a quantidades elevadas de fósforo.

Lana *et al.* (2004) em seu estudo objetivou avaliar o efeito de diferentes fontes de fertilizantes fosfatados tanto solúveis quanto reativos de menor solubilidade sobre a produtividade da alface cultivada em solo com pH previamente corrigido. Os resultados demonstraram que, na ausência de P, houve uma significativa redução na produção e no diâmetro da alface. Além de que as demais variáveis analisadas, relacionadas ao desenvolvimento das plantas, também apresentaram valores inferiores, evidenciando a importância do fósforo para condução adequada da cultura.

Por outro lado, destaca-se ainda que o uso e manejo inadequado de fertilizantes traz impactos ambientais negativos sobretudo relacionados a lixiviação e erosão e, assim, conhecer as reais necessidades nutricionais das plantas é de suma importância para o estabelecimento de protocolos eficientes de sistemas de produção (Batista *et al.*, 2018). Compreendendo a importância da cultura da alface na participação da alimentação humana, é fundamental conhecer os impactos do seu manejo nutricional nas mais variadas etapas de seu sistema de produção, de forma a assegurar sustentabilidade produtiva e de qualidades tanto ambientais como de segurança nutricional do produto colhido.

Portanto, destaca-se como fator relevante que sistemas de produção estejam conectados a parâmetros ambientais e qualitativos de segurança. Neste estudo, propõe-se a avaliação dos teores de cinzas e de nitrato nas folhas, como fatores de qualidade associado às doses de fósforo, para que recomendações futuras possam ser feitas em consonância com o binômio produtividade/qualidade. Embora o nitrato seja um composto encontrado naturalmente em hortaliças, seu excesso pode representar riscos à saúde humana e estar relacionado ao uso inadequado de fertilizantes. Neste contexto, seu teor foi avaliado como um indicativo da eficácia nutricional e da sustentabilidade do manejo implementado. Adicionalmente, a análise de possíveis alterações morfológicas do sistema radicular à doses de P_2O_5 , foi também implementada, para identificação mais detalhada dos limites de respostas, para gerar ferramentas indicadoras na própria planta das práticas agrícolas mais seguras e sustentáveis.

Assim, o objetivo deste estudo foi analisar os efeitos da adubação fosfatada, utilizando-se o termofosfato *Yoorin Master*® como fonte, aplicada durante o preparo inicial dos canteiros no cultivo da alface crespa cultivar 'Vera'. Foram avaliadas diferentes doses de P_2O_5 , sobre produtividade, biometria das plantas colhidas, morfologia do sistema radicular e na qualidade do produto colhido.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A CULTURA DA ALFACE

As variedades de alface mais consumidas no país são crespas e americanas, e ambas, ao longo do tempo, passaram por melhoramento que culminou em maior resistência ao cultivo no verão e/ou em regiões tropicais. É possível encontrar outras variedades dessa hortaliça, como as alfaces tipo roxa e com as folhas frisadas (Embrapa, 2023).

Segundo dados apresentados pela Observatory of Economic Complexity - Oec (2023), a alface foi o 634º produto mais comercializado do mundo, com um valor de comercialização em torno de 3,44 bilhões de dólares. O comércio dessa hortaliça representa 0,015% dos valores totais no globo. Em 2023, os maiores exportadores de alface foram Espanha (US\$1,03 bilhão), México (US\$554 milhões) e Estados Unidos (US\$534 milhões). Os principais importadores foram os Estados Unidos, com US\$588 milhões; o Canadá, com US\$488 milhões; e a Alemanha com US\$486 milhões.

Em relação aos desafios do processo produtivo da cultura, destaca-se sua exigência em fertilidade do solo ou substratos de cultivo. A alface requer uma atenção quanto ao manejo de adubações em seus sistemas de produção a fim de se evitar as significativas reduções de produtividade frequentemente observadas quando este item é negligenciado. O manejo correto de nutrientes em suas diferentes fases de desenvolvimento garante uma produção de alta qualidade (Gomes, 2024). Neste contexto, destaca-se o fósforo P_2O_5 , considerado o alicerce dos sistemas produtivos na cultura da alface, onde sua recomendação é a base para a garantia de produtividades economicamente viáveis e, além disso, para a obtenção de um produto de qualidade do ponto de vista da comercialização. Os teores disponíveis de P em solos tropicais são reconhecidamente baixos, devido à sua fixação intensa nas superfícies coloidais dos mesmos, o que, somado ao limitado desenvolvimento radicular da cultura da alface, faz o seu requerimento externo ser frequentemente elevado (Machado, 2021). Sendo o processo de fertilização crucial para a agricultura moderna, com impactos significativos na produção (Silva, 2024).

Em valores nutricionais, Kim *et al.* (2016), relataram que a alface possui em sua composição 95% de água, sendo baixa em calorias. Os nutrientes dessa planta estão ligados à sua fibra alimentar, com presença de minerais, vitaminas e alguns compostos bioativos. Tendo baixo teor de Na e um bom fornecimento de Ferro, com variações dessas disponibilidades conforme os tipos de cultivares.

Mesmo com baixos acúmulos gerais em nutrientes, há estudos que mostram que a cultura de alface pode fornecer quantidades consideráveis de nutrientes específicos, como o folato, carotenóides e compostos fenólicos. Além disso, essas características nutricionais podem ser ampliadas juntamente com mudanças nas práticas de manejo e cultivo (por exemplo, fertilização adequada) (Kim *et al.* 2016).

2.2 FÓSFORO PARA A PLANTA E FATORES QUE INTERFEREM NA SUA DISPONIBILIDADE.

Segundo Taiz; Zeiger (2017) o P tem um papel importante para as plantas com reações de armazenamento e transferência de energia, além da manutenção da integridade estrutural das células vegetais. Se faz presente em diferentes moléculas fundamentais no metabolismo vegetal tais como açúcares-fosfato, ácidos nucleicos, nucleotídeos, coenzimas, fosfolipídeos e ácido fítico.

O fósforo em contraste, por exemplo com o nitrogênio, tem suas fontes ou reservas baseadas em rochas que, reconhecidamente, são consideradas finitas. Somado a isso, suas pesadas doses recomendadas, como no caso da cultura da alface, podem desencadear problemas ambientais importantes como a eutrofização de rios, lagos e represas (Grzebisz *et al.*, 2024).

Alguns fatores afetam a disponibilidade de P para as plantas e vão desde o tipo e a mineralogia dos solos, além de suas concentrações e fatores indiretos que atingem a raiz da planta como a umidade do solo, temperatura, e até mesmo a influência competitiva imposta por outros nutrientes presentes ou fornecidos às plantas (“GSA - Nutrition-Facts - Brasil”, 2025).

O fósforo é um mineral de baixa solubilidade, encontrado em sua maioria fixado na matriz sólida do solo, mediado por ligações físico-químicas de natureza diversas. Pode ainda, se ligar a elementos metálicos no solo tornando-se ainda mais insolúvel, como nos óxidos de ferro e alumínio. Sendo assim, sua absorção pelas plantas é dependente do processo difuso, o que o coloca entre os nutrientes considerados pouco móveis no solo. Destaca-se ainda o impacto do pH na sua disponibilidade. Solos com pH elevado, formam fosfato de cálcio que podem dificultar a absorção do elemento (fósforo). Já em solos de pH baixo, caracterizados por sua acidez, ocorre a formação de fosfato de alumínio e ferro, onde o mesmo tem muita afinidade. Portanto, um método para tornar o fósforo acessível é regular o pH do solo. Os níveis ideais devem oscilar entre 5,5 e 6,5, pois é esse valor que garante a maior

disponibilidade do nutriente (Tmf, 2023).

A textura do solo também afeta a disponibilidade de P, Machado e Souza (2012) relataram que solos tanto arenosos quanto argilosos têm disponibilidade de fósforo aumentada conforme a dose é elevada com o tempo de cultivo. No entanto, o solo arenoso exibiu maior disponibilidade média do mineral, enquanto o solo de textura média a argilosa mostrou maior adsorção de P. De acordo com diferentes classes texturais, é possível estabelecer indicação correta de fertilização. Em outras palavras, solos muito argilosos requerem maiores doses do fertilizante fosfatado em comparação com outras categorias de textura (Lima, Paiva e Andrade, 2024).

Outro fator que influencia a disponibilidade de fósforo no solo é a matéria orgânica (MO), mas essa influência é variável, pois, a mesma pode tanto diminuir quanto aumentar a disponibilidade de P no solo, isso à custa do ambiente criado após a adição da MO. A MO pode sofrer influência variada conforme o adsorvente presente no solo. Conhecida por desempenhar um papel na sorção (dessorção e/ou adsorção), a MO pode ter um efeito indireto na inibição da cristalização de Fe e Al a longo prazo. Isso pode levar à formação de Al e Fe pedogênicos menos cristalinos, com maior SSA (Superfície Específica Aparente), o que consequentemente eleva a adsorção de P. Sendo assim, a interferência de MO, em solos tropicais que são intemperizados ainda possui controvérsias. O manejo de MO deve ser cauteloso para que ao adicionar MO para aumento de P, não ocorra o contrário do esperado (Magabala; Mungongo, 2022).

O fósforo absorvido pelas raízes ocorre em forma ionizada de H_2PO_4^- (Dihidrogenofosfato ou íon fosfato monobásico) ou HPO_4^{2-} (Hidrogeno fosfato ou íon fosfato dibásico), onde o mineral será transportado para a parte superior da planta, e então ocorrerá a assimilação com as moléculas orgânicas (Carvalho; Moreira, 2024).

O manejo racional da adubação fosfatada só será alcançado, com o entendimento adequado das dosagens críticas sobre as culturas e devidamente relacionadas às condições específicas de cultivo (Grzebisz *et al.*, 2024). Gomes *et al.* (2020) relataram que em um período de 8 dias sem o fornecimento de fósforo, foram observados, na alface, sintomas como lento crescimento, em comparação a plantas com nutrientes em níveis ideais, acentuando o atraso em 21 dias, somando-se a isso o enrolamento das folhas e raízes com baixo crescimento e de coloração escurecida.

Em relação à carência de fósforo, estudos como o Hammond; White (2007) demonstraram que na privação de P as plantas tendem a climatizar para aquele ambiente com

baixa concentração de P, desencadeando uma série de reações nas plantas seja transcricionais, bioquímicas e fisiológicas.

2.3 ADUBAÇÃO FOSFATADA E IMPORTÂNCIA DO MANEJO SUSTENTÁVEL.

Os adubos e/ou fertilizantes são compostos químicos, minerais ou orgânicos, naturais ou sintéticos, combinados ou não, que possuem em seu ingrediente 1 ou mais nutrientes que objetivam suprir as necessidades nutricionais das plantas. Assim, quando adicionados aos solos, é esperado que se obtenha uma melhora física, química e/ou biológica, se o mesmo for aplicado em quantidades e de forma correta (Zonta *et al.*, 2015).

Superfosfato triplo, superfosfato simples, fosfato monoamônico (MAP) e fosfato diamônico (DAP) são as principais fontes de fósforo utilizadas na adubação. Como mencionado anteriormente, o P é encontrado em grandes quantidades no solo, mas se liga facilmente a outros elementos do solo (fenômeno da fixação) o tornando indisponível (Boschiero, 2023).

Os fertilizantes com tecnologias anti fixação, com natureza química modificada, liberação controlada, sinérgicos, blends e fertilizantes com várias funcionalidades, são uma opção a ser levada em conta para aprimorar a eficácia da fertilização fosfatada na agricultura, inserida em um vasto conjunto de estratégias com o mesmo objetivo. O resultado desejado pode ser alcançado se levado em conta fatores essenciais e simples, como aplicação de calcário e gesso, ou através de estratégias mais refinadas como, sistema plantio direto, agricultura de precisão e sistemas integrados (Guelfi *et al.*, 2022).

Segundo Cruvinel (2025), a adoção fertilizantes organominerais e os fertilizantes minerais revestidos com polímeros possuem maior disponibilidade de fósforo na solução do solo em comparação com os fertilizantes minerais convencionais, conforme evidenciado pela maior extração pelo método da resina. Isso sugere uma diminuição considerável na fixação do fósforo, consequência da proteção física e química oferecida por essas tecnologias, que atrasam a interação direta do nutriente com os colóides do solo.

Os trabalhos de eficiência agrônômica não devem ser esquecidos, pois, através deles, que se identifica situações de manejo em que a utilização de insumos são maximizados, e assim se alcança importantes performances das culturas dentro de aspectos econômicos e ambientais. No caso do P, ganhos na sua eficiência de aplicação, pode se configurar em condição crítica chave, para a redução de impactos ambientais, garantir a obtenção de produtos agrícolas de qualidade e ainda potencializar a adoção de princípios de

sustentabilidade e economia circular (Guelfi *et al.*, 2022).

O uso indiscriminado de fertilizantes fosfatados traz consequências negativas para o meio ambiente. Segundo Jiao *et al.* (2012), ao se aplicar fertilizantes fosfatados e outros micronutrientes em um longo período, pode-se elevar as concentrações de As (Arsênio), Cd (Cádmio) e Pb (Chumbo) nos solos agrícolas, especialmente se os fertilizantes utilizados apresentarem quantidades elevadas desses elementos. É crucial que os níveis de elementos potencialmente nocivos em fertilizantes sejam monitorados e controlados .

A quantidade de fertilizantes e o tipo de solo, devem ser considerados no aspecto a susceptibilidade a processos erosivos de diversas naturezas. Agentes contaminantes podem ser lixiviados, carreados superficialmente e ou pelo vento, o que em última análise pode afetar a saúde das pessoas, animais e os demais seres vivos (Cirino *et al.*, 2008). Neste contexto, Roberts; Johnston (2015) relataram que os fertilizantes fosfatados são considerados como os mais ineficientes, pois têm baixa absorção, apenas cerca de 10 a 15% são recuperados pelas plantas. O P que não é absorvido torna-se indisponível pelas mudanças em suas formas. Entretanto, este tema pode ser controverso, pois os autores demonstraram que, ao se referir a pools de biodisponibilidade variável de P, como o P recém-aplicado e residual, este último torna-se disponível para as raízes das plantas por tempo considerável. Pode-se, portanto, avaliar a eficiência do fertilizante de variadas formas e, certamente, o seu efeito residual deve ser considerado e, assim sendo, a recuperação do P utilizado pode ser maximizada. A recuperação de P pelas culturas é afetada pela forma como é administrado e pode ser potencializada através da implementação correta dos 4Rs, aplicando a quantidade correta de fertilizante, na taxa correta, no momento e no local apropriado.

Os fertilizantes fosfatados possuem características importantes que devem ser analisadas e conhecidas para uma melhor aplicação e utilização. As características físicas e químicas do solo interferem no resultado da fertilização, sendo o principal fator determinante de eficiência na fertilização fosfatada (Hansel *et al.*, 2014).

Nas regiões tropicais, a prática de fertilização fosfatada em grandes volumes é corriqueira, acima das necessidades dos vegetais. Grandes volumes do P aplicado não é utilizado pelas plantas e, assim, a eficácia do uso desse recurso na agricultura tropical está muito aquém do ideal, oscilando entre 15 a 50% (Lins, 2022).

2.4 NITRATO

A fertilização é um importante recurso para promover o crescimento e desenvolvimento das plantas. É possível encontrar fertilizantes com uma variada combinação de nutrientes, e vem sendo utilizado a décadas em ampla variedade de plantas. Mesmo sendo indispensável para a agricultura moderna, este, se utilizado de forma incorreta traz resultados indesejáveis. Uma grande parte do fertilizante utilizado no solo, é perdido, através da erosão e lixiviação, levando a contaminação das águas (Oregon State University, 2017).

O nitrato e o nitrito são componentes naturais encontrados no ambiente, em suas formas iônicas. Podem ter como fonte a decomposição de animais, vegetais e fazem parte do ciclo do nitrogênio. Possuem baixa reação e boa solubilidade em água, as formas iônicas dessas substâncias são encontradas, em sua maioria, dissociadas na água. O nitrito passa pela oxidação formando assim o nitrato que é uma forma mais estável. Estes dois componentes são essenciais para a vida, como nutrientes de plantas e parte de órgãos e tecidos humanos e suas várias funções (Cetesb, 2022).

Os seres humanos têm contato com nitrato e nitrito através da ingestão de água e alimentos que contêm esses nutrientes. Estão ricamente presentes em produtos cárneos, curados (nitrito) e em especial em hortaliças folhosas (nitrato e nitrito). Contudo, em algumas áreas, a água destinada ao consumo humano pode ser a principal fonte de nitrato e, em alguns casos, de nitrito. No organismo humano, a maior parte do nitrogênio é eliminada na urina, enquanto pequenas quantidades podem migrar da circulação sanguínea para a saliva, por exemplo, e serem absorvidas e convertidas em nitrito (Cetesb, 2022).

Essas duas substâncias são controversas, isso refere-se tanto a substância natural quanto aditiva. O nitrato é consumido abundantemente através dos vegetais, sendo as folhas as principais fontes desse elemento. O nitrato não é tóxico, mas a presença de bactérias anaeróbicas no trato intestinal faz a conversão de nitrato em nitrito, este último contendo um grau de toxicidade. A discussão sobre dieta e o metabolismo subsequente de compostos contendo nitrato em nitrosaminas estão relacionados aos efeitos prejudiciais da dieta sobre os consumidores porque estão ligados ao risco de câncer gastrointestinal

Estudos apontam uma maior quantidade de nitrato encontrada em folhas de alface, produzidas em sistemas hidropônicos sendo superior à alface cultivada no sistema convencional, com uma média de 1.588 mg.kg⁻¹ de peso fresco no cultivo hidropônico e 939 mg kg⁻¹ de peso fresco no cultivo convencional (Bennini *et al.* 2002). O mesmo foi relatado no estudo de Felipe e Pereira (2020), a alface hidropônica apresentou maior teor de nitrato

que a convencional, visto que nesse sistema, a solução nutritiva já contém nitrato disponível para absorção da planta.

É possível ver que a maneira como as plantas são cultivadas e a variedade utilizada influenciam de forma expressiva o nível de nitrato nas folhas de alface. Pedrinho *et al.* (2021) relataram que o cultivo orgânico resultou nos menores níveis de nitrato, enquanto o cultivo hidropônico apresentou o maior acúmulo deste composto. E nos três cultivos analisados, os níveis de nitrato nas folhas de alface ficaram abaixo dos limites recomendados pela FAO/OMS e pela União Europeia.

2.5 IMPACTOS DA ADUBAÇÃO FOSFATADA E A RELAÇÃO COM O ACÚMULO DE NITRATO

O excesso de P não só causa impactos diretos no meio ambiente, mas também afeta o metabolismo do nitrogênio nas plantas, levando ao acúmulo de nitrato nos tecidos foliares. O nitrato (NO_3^-) é fundamental como fonte de nitrogênio assimilável, porém, em altas concentrações nos alimentos, pode representar um perigo para a saúde humana, como mencionado no subitem anterior. No organismo, uma parte do nitrato pode ser transformada em nitrito (NO_2^-), o qual pode dar origem a compostos que têm o potencial de causar câncer, como as nitrosaminas (Karwowska e Kaniuk, 2020).

A utilização constante e não monitorada de fertilizantes fosfatados pode levar ao acúmulo de fósforo no solo, o que altera a dinâmica do ciclo do nitrogênio e afeta o metabolismo das plantas (Medeiros *et al.*, 2019). O excesso de P interfere na dinâmica do nitrogênio, podendo modificar a atividade de enzimas como a nitrato redutase. Essa enzima é responsável pelo acúmulo de NO_3^- nas folhas quando ocorre um desequilíbrio entre absorção e assimilação (Younis, Abd-Elrahman e Abdrabbo (2021)

O manejo inadequado do fósforo não só afeta diretamente as plantas, mas também gera consequências ambientais importantes. Pesquisas apontam que a recuperação do fósforo aplicado pelas culturas varia entre 10% e 30%, com o restante sendo retido no solo ou disperso no meio ambiente (Roberts e Johnston, 2015). Essa baixa eficiência na agricultura contribui para a contaminação das águas superficiais e subterrâneas e pode agravar a proliferação de cianobactérias, que produzem toxinas nocivas à vida (Smith; Schindler, 2009).

Além disso, fertilizantes minerais em especial os fosfatados podem incluir metais pesados, como cádmio (Cd), chumbo (Pb) e arsênio (As), que se acumulam no solo com o uso

contínuo, elevando o risco de contaminação da cadeia alimentar (Jiao *et al.*, 2012). A capacidade de adsorção do solo diminui com a saturação de fósforo, o que eleva sua mobilidade em direção às águas subterrâneas, principalmente em solos arenosos ou com baixa CTC (Sharpley *et al.*, 2013).

3 METODOLOGIA

3.1 LOCAL E MATERIAL VEGETAL:

O estudo foi realizado nas dependências do campus de Poços de Caldas-MG da Universidade Federal de Alfenas (Figura 1). A *Lactuca sativa*, tipo crespa cultivar Vera foi utilizada por se tratar de uma cultivar com alta adaptação às condições tropicais e subtropicais de cultivo, além da sua ampla aceitação no mercado local.

Figura 1- Local escolhido para experimento nas dependências do campus da Unifal-MG de Poços de Caldas-MG



Fonte: Autores (2025).

Legenda: a) Local da horta antes do preparo dos canteiros;

b) Canteiros no pré-plantio da alface.

3.2 ÁREA EXPERIMENTAL E PREPARO DOS CANTEIROS:

O estudo foi conduzido nas dependências do campus de Poços de Caldas-MG da Universidade Federal de Alfenas.

A área experimental foi dividida em dois canteiros centrais de 10 m × 1,2 m cada. De

posse do resultado da análise química do substrato dos canteiros, foi calculada a dose necessária de calcário (utilizou-se como fonte o calcário magnesiano – 8% MgO, PRNT 95%) para elevação do valor V (saturação por bases) a 80%, conforme recomendação da Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, Cfsmg (Ribeiro, Guimarães & Alvarez, 1999). Ainda conforme a Cfsmg (1999), efetuou-se uma adubação orgânica durante o preparo dos canteiros, com aplicação de esterco bovino curtido (15,4 % de matéria seca) na dosagem de 50 t/ha.

3.3 TRATAMENTOS E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Foram estabelecidos quatro tratamentos correspondentes a quatro doses crescentes de fósforo em pré-plantio, durante o preparo dos canteiros, usando como fonte o termofosfato *Yoorin Master*[®] :

P1 – zero aplicação de P_2O_5 /ha;

P2 – 350 kg de P_2O_5 /ha (recomendação da Cfsmg);

P3 – 700 kg de P_2O_5 /ha;

P4 – 1050 kg de P_2O_5 /ha.

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com cinco repetições. Cada parcela foi formada por 1 metro linear com quatro fileiras de plantas (Figura 2). As laterais foram definidas como bordaduras, e nas duas fileiras centrais, duas plantas escolhidas aleatoriamente foram destinadas à coleta de amostras vegetais. Foram utilizadas 20 parcelas no total. As mudas foram transplantadas simultaneamente, no mesmo dia, totalizando 320 mudas. Cada tratamento recebeu 80 mudas distribuídas em quatro fileiras, que foram conduzidas por um período de 42 dias do plantio até a colheita.

Figura 2 - Canteiros pós plantio (doses de fósforo) na sobre a cultura da Alface tipo crespa cultivar vera, nas dependências do campus da Unifal-MG de Poços de Caldas-MG



Fonte: Autores (2025).

Legenda: a) Canteiros pós plantio;
b) Canteiros pós-plantio da alface.

3.5 ADUBAÇÃO DE COBERTURA:

A adubação de cobertura foi feita com solução nutritiva parcelada em três aplicações semanais a partir da segunda semana após o plantio. As dosagens totais em cobertura, somando-se as três aplicações, totalizaram por nutriente: N (44,55 kg/ha), P_2O_5 (24,21 kg/ha), K_2O (53,55 kg/ha), Ca (36,54 kg/ha), Mg (6,44 kg/ha), S (0,1 kg/ha), Zn (0,07 kg/ha), Cu (0,4 kg/ha), B (0,05 kg/ha), Mn (0,17 kg/ha), Fe (0,77 kg/ha), Mo (0,01 kg/ha).

3.6 AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO DAS PLANTAS:

Foram realizadas medições da altura e diâmetro da cabeça no final do ciclo de crescimento. A massa fresca da cabeça e a massa seca da raiz foram calculadas com base nos valores médios obtidos das duas plantas centrais das parcelas, por repetição, para estimativa da produtividade.

3.7 COLETA DE AMOSTRAS PARA ANÁLISES:

No momento da colheita, cada cabeça (das duas plantas centrais) foi pesada e armazenada para análises posteriores. Também foram coletadas amostras de todo o sistema radicular até 15 cm de profundidade. A morfometria da cabeça das plantas foi mensurada com auxílio de uma régua, avaliando-se altura (cm) e diâmetro (cm) conforme Nascimento *et al.* (2021).

3.8 ANÁLISES LABORATORIAIS:

A análise do sistema radicular foi realizada em triplicata, utilizando o software WinRHIZO, o qual determina o comprimento, volume e área de superfície das raízes (totais e por classes).

O teor de nitrato também foi determinado em triplicata, pelo método colorimétrico rápido de nitração com ácido salicílico, conforme *Vezina e Bonami (1975)*. Para essa análise, as amostras de alface foram previamente secas, maceradas e acondicionadas em tubos de Eppendorf, sendo posteriormente submetidas a centrifugação e aquecimento. Após esse processo, 1 mL do extrato foi retirado e diluído em soluções contendo 10 a 50 diluições de nitrato de potássio, sendo, por fim, realizada a leitura em espectrofotômetro.

A determinação do teor de cinzas também foi conduzida em triplicata, onde as cabeças de alface foram secas, maceradas e pesadas (aproximadamente 1 g), acondicionadas em cadinhos e posteriormente aquecidas em mufla até completa incineração, obtendo-se o resíduo mineral (cinzas).

3.9 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Inicialmente, os dados foram organizados em quatro grupos de variáveis em uma planilha excel, sendo o primeiro a produtividade, um segundo abrangendo a morfometria da cabeça e pesos secos individuais por planta e raiz além da relação parte aérea:raiz, um terceiro grupo com parâmetros morfológicos do sistema radicular e finalmente um quarto grupo com parâmetros de qualidade do produto colhido. A planilha foi lida no ambiente de programação *Python* (versão 3.10). As colunas foram padronizadas e a base de dados foi agrupada com

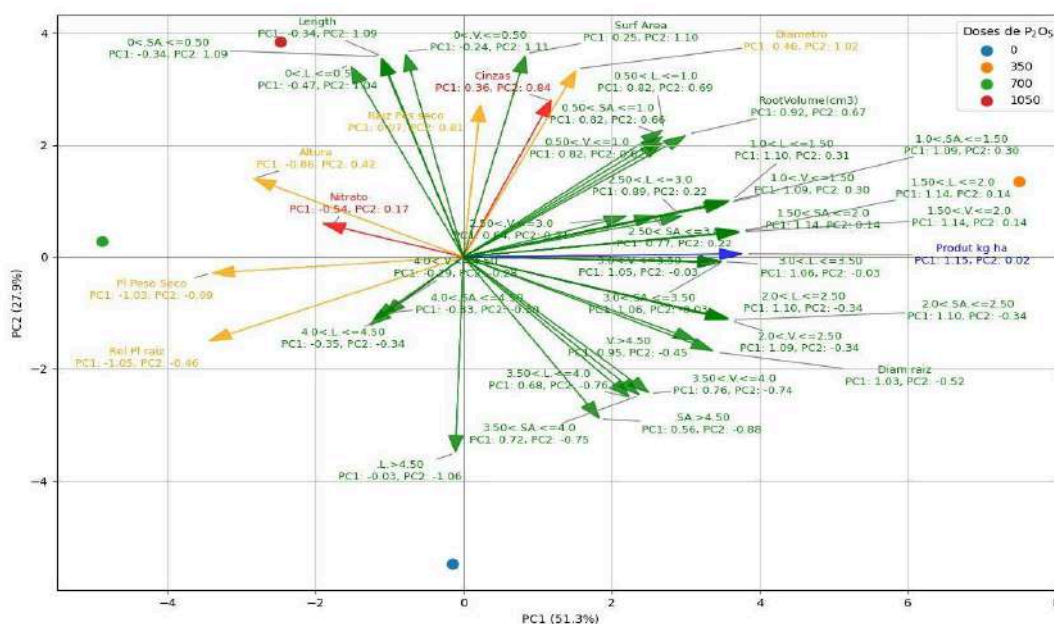
base na variável “Doses de P_2O_5 ”, de modo que cada linha representa a média das repetições de um tratamento. Em seguida, com o objetivo de identificar padrões de respostas multivariadas às diferentes doses de fósforo (P_2O_5), redução da dimensionalidade dos dados, visualização de agrupamentos e a identificação das variáveis mais influentes no sistema, foi aplicada uma Análise por Componentes Principais (*PCA – Principal Component Analysis*) aos dados experimentais, segundo metodologia descrita por *Jolliffe e Cadima (2016)*.

Na sequência, de forma individual, as variáveis foram avaliadas e processadas no software SISVAR versão 5.8 (Ferreira, 2011), com a finalidade de verificação da significância dos efeitos de tratamentos na análise de variância (ANOVA), e subsequente teste de significância, ao nível de 5% de probabilidade, das equações de regressões geradas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pela análise por componentes principais (PCA) verificou-se padrões multivariados de respostas, a partir dos dados médios das variáveis avaliadas em cada conjunto amostral (doses de P_2O_5), estas utilizadas como critério de agrupamento das variáveis e, assim sendo, possível distinguir grupos qualificados como características de produtividade, crescimento vegetativo, parâmetros do sistema radicular além da qualidade do produto colhido (Figura 3).

Figura 3 - Análise por componentes principais (PCA) sobre características de produtividade, crescimento vegetativo da cabeça, parâmetros do sistema radicular além da qualidade do produto colhido da cultura da alface cultivar vera, sobre influência de doses crescentes de adubação fosfatada aplicada em pré-plantio no município de Poços de Caldas



Fonte: Autores (2025).

Os vetores foram gerados (setas) representando a correlação das variáveis com as componentes principais, e os pontos coloridos indicando a dispersão dos tratamentos definidos por doses de fósforo. Quanto mais longa a seta, mais essa variável contribui para a separação dos tratamentos. Portanto, encontram-se representados na Figura (3), a dispersão espacial de como as variáveis se relacionam entre si e como os tratamentos de doses de P_2O_5 (0, 350, 700, 1050 $kg\ ha^{-1}$) se distribuem com base no conjunto das variáveis estudadas. A PC1 (51,3%) e PC2 (27,9%) juntos explicaram cerca de 79% da variação total dos dados, o que significa que grande parte das informações importantes estão discriminadas neste gráfico. Destaca-se o tratamento 350 $kg\ ha^{-1}$ P_2O_5 (laranja escuro), representando a dose padrão

recomendada para a cultura, onde sua dispersão posicionada ao lado direito do gráfico, apresentou forte associação sobretudo com variáveis como produtividade e parâmetros morfológicos do sistema radicular.

Observa-se ainda que um dos parâmetros de qualidade do produto colhido (o teor de nitrato), encontra-se posicionado do lado esquerdo do gráfico e, portanto, numa correlação negativa com a dose recomendada de 350 kg ha⁻¹. No entanto, se encontra posicionado do mesmo lado de doses elevadas como 750 e 1050 kg ha⁻¹; bem como da dose zero.

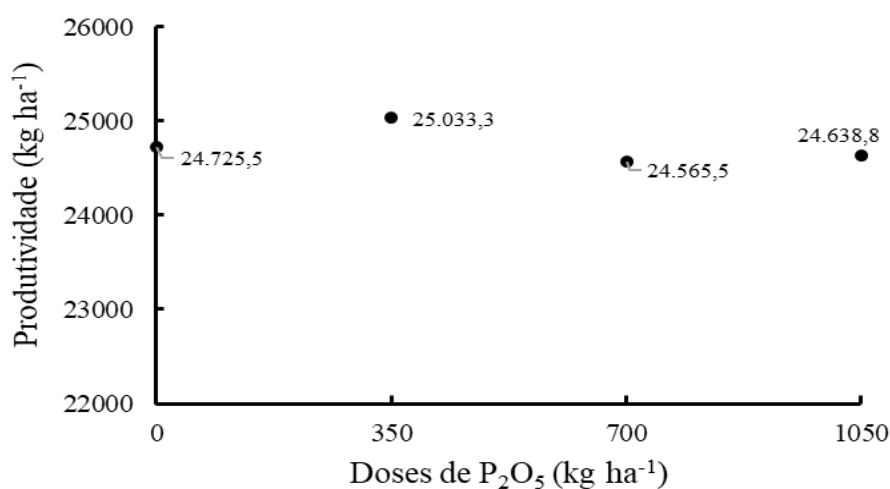
A análise por componentes principais pode revelar possíveis relações complexas. Como já mencionado, o teor de nitrato posicionado no quadrante de maiores doses de P₂O₅, mas com sua variabilidade mais ligada ao eixo PC2, pode ser influenciado por fatores independentes da produtividade e do crescimento radicular, como sua disponibilidade no solo e/ou sua taxa de assimilação pela planta. Essa dinâmica sugere que, em doses intermediárias de fósforo, pode ocorrer um aumento da eficiência de assimilação do nitrato pela planta, o que explicaria a menor concentração residual interna. O fósforo é conhecido por estimular o crescimento radicular e a atividade de enzimas relacionadas à absorção e assimilação de nitrogênio, como a redutase do nitrato (Raghothama, 1999; Zhang *et al.*, 2021). Assim, em doses como 350 kg ha⁻¹, pode haver maior integração entre oferta e demanda de nitrogênio em sua dinâmica assimilatória, reduzindo sua presença na forma de nitrato.

Por outro lado, nas doses mais elevadas (700 e 1050 kg ha⁻¹), o acúmulo de nitrato pode ser resultado de uma saturação no aproveitamento, onde o crescimento da planta já não acompanha o suprimento de nitrogênio mineralizado ou residual no solo. É importante destacar ainda, a presença de um sistema radicular mais denso na dose de 350 kg ha⁻¹ (dados do *Winrhizo*), ou seja, com um maior número de classes específicas do sistema radicular correlacionadas a esta dose mas, mesmo assim, não sendo determinante para mobilização de maiores acúmulos de nitrato nesta dose.

4.1 PRODUTIVIDADE

Para a variável produtividade em kg ha^{-1} , não houve resposta significativa às doses crescentes de P_2O_5 aplicadas no pré-plantio. Isso indica que o aumento do fósforo não resultou em incrementos estatisticamente significativos na massa fresca da parte aérea (Figura 4).

Figura 4 - Produtividade da alface tipo crespa cultivar vera aos 42 dias de um cultivo inicial, cultivada em canteiros preparados com diferentes doses de adubação fosfatada no município de Poços de Caldas-MG



Fonte: Autores

Entender o funcionamento do P no solo é essencial para a produção agrícola, pois esta é dependente deste importante recurso considerado não renovável. As várias interações que descreve no solo e sua interface com a planta, é aspecto crítico para garantir rendimento agrícola e sustentabilidade ambiental. Novas pesquisas devem buscar compreender os desafios da nutrição de P nos solos tropicais, concomitantemente focados no aumento da produtividade aliada à qualidade dos produtos colhidos e à sustentabilidade ambiental (Kunwar *et al.*, 2018). Neste contexto destaca-se ainda Novais *et al.* (2007) ao afirmarem que aplicações adicionais que excedam a demanda das culturas agrícolas não geram aumentos na produtividade, pois os seus caminhos frequentemente estarão relacionados aos fenômenos da fixação e/ou precipitação, ou sujeito aos processos de perdas por erosão ou lixiviação.

Mota *et al.* (2003) destacaram a importância da fertilização fosfatada na produção da alface. Os autores notaram que com superfosfato simples obteve-se um rendimento total superior ao termofosfato de magnésio, possibilitando atingir elevada produtividade com doses reduzidas do fertilizante. De acordo com os autores, a quantidade mais eficaz de superfosfato

simples para otimizar a produção comercial foi de 617 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Este fato enfatiza a relevância em se estabelecer não só a quantidade correta de fósforo mas também a fonte, para assegurar resultados positivos sem desperdício de recursos. Destaca-se que no presente estudo utilizou-se um termofosfato.

Mantovani *et al.* (2014) também obtiveram resultados significativos em vários parâmetros com a aplicação de fósforo: produção de matéria fresca e seca, os teores e as quantidades acumuladas de P na parte aérea da alface e os teores de P no solo. O estudo evidenciou que o aumento da dosagem de P₂O₅ resultou em alterações no teor de fósforo do solo, refletindo na produtividade das culturas. No entanto, a resposta da alface à fertilização pode depender de vários fatores, como o tipo de solo e a eficiência de absorção das raízes. Estes concluíram que a produção de alface crespa é positivamente correlacionada à disponibilidade de fósforo no solo.

Fatores como o tipo de solo afetam a absorção de nutrientes pela planta e podem exigir uma análise diferenciada na aplicação de fósforo no solo. Pesquisas realizadas com outras culturas indicam que o pH do solo também influencia a disponibilidade de fósforo para as plantas. Em uma pesquisa que objetivava analisar o impacto do pH do solo e da adição de calcário em dois Latossolos na disponibilidade de P e no acúmulo desse elemento nas plantas de soja, constatou-se que os fatores mencionados aumentaram a produção de massa seca e o acúmulo de P na parte aérea, conforme o pH aumentava (Viviani *et al.*, 2010). Como a fonte utilizada no presente estudo possuía Ca (17%), este supostamente poderia atuar na elevação do pH com a aplicação de doses crescentes, porém, tal fato não se reverteu em aumento de produtividade no substrato em estudo.

Praça (2023) demonstrou que a dinâmica do fósforo difere significativamente entre os tipos de solo, sendo esta afetada por elementos como o intemperismo e a composição mineral. O estudo enfatizou a relação entre o fósforo e as características do solo, tais como argila, pH e matéria orgânica, que têm um papel fundamental na disponibilidade e distribuição desse nutriente. O mesmo enfatizou que a matéria orgânica do solo foi reconhecida como um regulador fundamental da temperatura do solo, e foi possível notar que alteração nas formas instáveis para estáveis em solos mais intemperizados, deveu-se à influência da matéria orgânica.

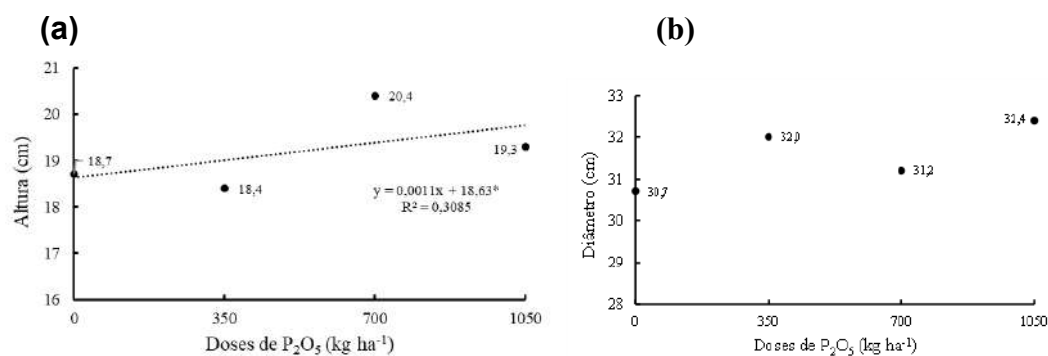
A falta de resposta estatística na produtividade da alface neste estudo à adubação fosfatada em pré-plantio na colheita sugere que as condições do substrato e o manejo implementado já atendiam às necessidades nutricionais da planta. A aplicação de adubação

orgânica e a correção da acidez foram adequadas para assegurar o crescimento e o acúmulo de biomassa da parte aérea. Destaca-se ainda que uma pequena dose de fósforo foi aplicada em cobertura, em todo o experimento, por meio de solução nutritiva. Plantas de ciclo curto como a alface podem se beneficiar da maior solubilidade desta solução, e não expressar efeito do fósforo aplicado no plantio.

MORFOMETRIA DA CABEÇA DA ALFACE:

Pesquisas indicam que variadas estratégias de manejo do solo e de fertilização afetam variáveis morfométricas associadas ao desenvolvimento da cultura da alface. Neste estudo, constatou-se que as doses de fósforo afetaram de forma significativa com ajuste linear positivo para a altura da planta (Figura 5a), mesmo que bem discreto. Ziech *et al.* (2014) encontraram resultados parecidos, observando que a cobertura do solo e a fonte de fertilização podem influenciar a altura e a quantidade de folhas da alface ao longo dos ciclos produtivos.

Figura 5 - Variações em altura (a) e diâmetro (b) da cabeça da alface tipo crespa cultivar vera cultivada em canteiros preparados com diferentes doses de adubação fosfatada no município de Poços de Caldas-MG



Fontes: Autores

Corrêa *et al.* (2018) mostraram que, desde que não haja aumento vertical excessivo que comprometa a firmeza da cabeça, o crescimento da altura das hortaliças folhosas está diretamente ligado ao aumento da biomassa comercial e ao apelo visual para o consumidor.

Estudos conduzidos por Souza *et al.* (2020) demonstraram que a aplicação de fertilizantes fosfatados pode aumentar consideravelmente o diâmetro das hortaliças folhosas, o que afeta diretamente a produtividade e o valor comercial do produto. Entretanto, para a variável diâmetro da cabeça, tal fato não foi observado (Figura 5b) para o presente estudo.

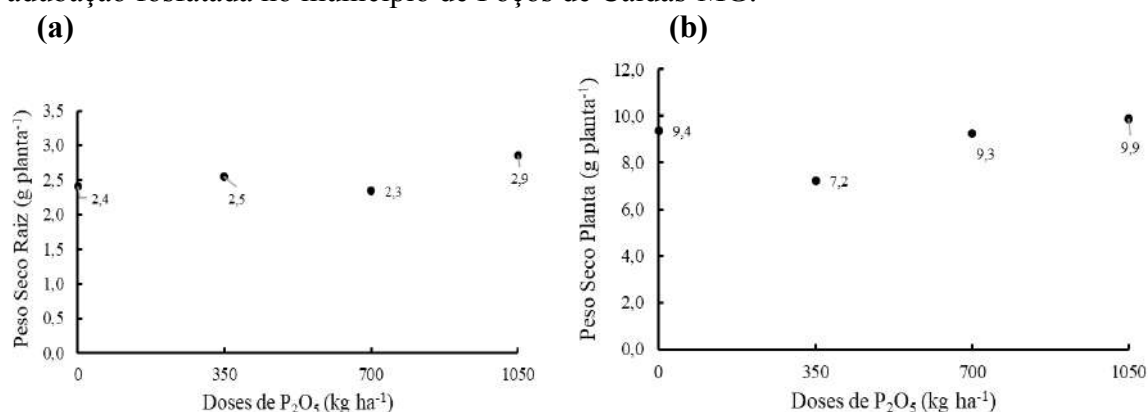
Tamelini *et al.* (2024) analisou diferentes doses de P em alface vermelha (*Scarlett*), utilizando fertilizantes fosfatados orgânicos ou não, sendo eles o termofosfato magnesiano Yoorin e farinha de ossos, em cinco doses de fósforo aplicadas antes do plantio (0, 200, 400, 600 e 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅). Obtiveram resultados que demonstraram que a interação entre os fatores foi significativa para o diâmetro da cabeça, e o fator de dose foi significativo em todas as fontes estudadas e influenciaram a altura das plantas, largura, comprimento da folha, massa seca e perímetro cefálico.

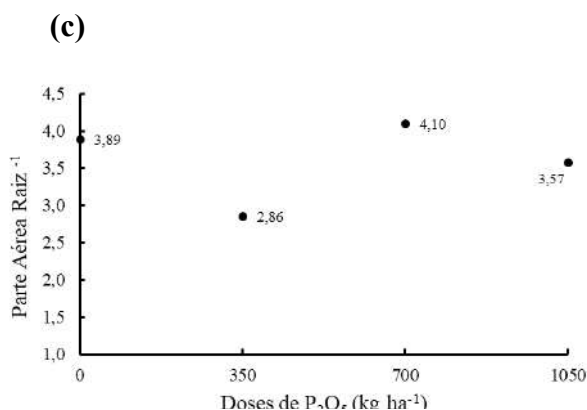
Ao comparar as fontes, Tamelini *et al.* (2024) observaram que o uso da farinha óssea produziu valores mais altos em massa seca total, perímetro e diâmetro da cabeça apenas na dose de 400 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Por outro lado, o uso do termofosfato de Yoorin resultou em maior altura das plantas e na largura das folhas, enquanto para o número de folhas e a massa fresca, não verificaram-se diferenças entre as fontes. Pôde-se constatar que para a produção da cultivar *Scarlett* em solos com deficiência de fósforo, o fertilizante fosfatado de liberação lenta pode levar a respostas superiores àquelas observadas para fosfatos solúveis.

4.2 MASSA SECA MÉDIA DA PLANTA E RAÍZ E SUAS RELAÇÕES

Os dados apresentados na Figura 6, demonstram que a adubação fosfatada, para o intervalo estudado, não impactou positivamente a biomassa da parte aérea, da raiz, bem como a relação parte aérea:raiz no momento da colheita, gráficos a, b e c; respectivamente.

Figura 6- Peso seco médio de raiz (g) (a) por planta (b) e relação parte aérea:raiz (c) da alface tipo crespa cultivar vera cultivada em canteiros preparados com diferentes doses de adubação fosfatada no município de Poços de Caldas-MG.





Fonte: Autores (2025).

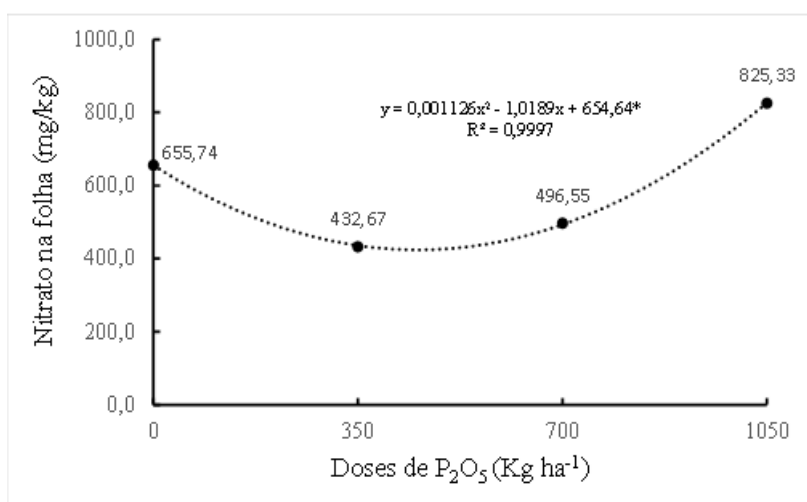
Mantovani *et al.* (2014) relataram que a elevação da dose de P₂O₅ é benéfica para o acúmulo de matéria seca na parte aérea da alface, refletindo em parâmetros de crescimento. A matéria seca da raiz e a raiz/parte aérea foram influenciadas pela interação entre as variedades e doses de P, com a Lisa apresentando os maiores valores dessas características nas menores doses avaliadas. Corroborando com os autores citados, Bertossi *et al.*, (2013), avaliando a eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo em duas variedades de alface, verificaram que a matéria seca da raiz e da parte aérea foram influenciadas pelas duas variedades e pelas diferentes doses de fósforo, sendo a alface do tipo Lisa a que apresentou melhores resultados com doses menores.

Segundo Lana *et al.* (2004) a alface reagiu de maneira diferenciada de acordo com as fontes de fósforo, para parâmetros como a massa fresca e seca da parte aérea, a massa fresca das raízes e o conteúdo de fósforo no solo, seguindo a seguinte sequência de eficiência: fosmag, superfosfato triplo, superfosfato simples, termofosfato magnésiano e fosfato reativo de Arad. Ademais, tanto as fontes fosmag quanto o superfosfato triplo apresentaram equivalência em relação à massa seca das raízes e ao diâmetro das plantas. Os níveis de fósforo acumulados nas folhas foram superiores e iguais para as fontes fosmag, superfosfato triplo e superfosfato simples, em comparação ao termofosfato de magnésiano e ao fosfato reativo de Arad, particularmente em condições de acidez controlada.

4.3 ACÚMULO DE NITRATO NO TECIDO VEGETAL

Para o teor de nitrato na folha da alface (Figura 7) constatou-se resposta quadrática significativa, sendo a dose de 452 kg ha⁻¹ de P₂O₅ o ponto estimado para o menor teor de nitrato nas plantas. A partir dessa dose, portanto, foi verificada a retomada do aumento na concentração de nitrato, o que indica que aplicações superiores favorecem o acúmulo de nitrato na folha. Como mencionado, esta resposta pode estar relacionada à assimilação de nitrogênio pelas plantas, uma vez que a aplicação adequada de fósforo no solo influencia diretamente o metabolismo energético vegetal, pois o mesmo atua na síntese de ATP (Taiz & Zeiger, 2017), molécula essencial para otimizar o processo.

Figura 7- Concentração de nitrato em mg kg⁻¹, aos 42 dias pós-plantio, em folhas de alface crespa cultivar vera em função de diferentes doses de fósforo aplicadas no preparo inicial dos canteiros no município de Poços de Caldas



Fonte: Autores (2025).

Elsayed et al. (2021) reforçaram que doses adequadas de fósforo podem otimizar a assimilação de nitrato. Os autores investigaram o acúmulo de nitrato em alface cultivada em solo argiloso, aplicando solução nutritiva por meio de fertirrigação. O nitrato foi incorporado na forma de nitrato de amônio. O estudo demonstrou que a adição de fósforo (P) em equilíbrio com o nitrogênio (N) contribuiu para reduzir a concentração de NO₃⁻ (nitrato) e diminuir a taxa de acúmulo desse íon nos tecidos vegetais e, assim, verificaram interação significativa entre os níveis de N e P com melhor performance para aplicação de 180 mg N L⁻¹ (miligramas de nitrogênio por litro de solução) com 55 mg P L⁻¹. Este resultado corrobora com o fato do

tratamento controle (0 kg ha^{-1}) apresentar níveis mais elevados de nitrato em comparação com a dose estimada de 452 kg ha^{-1} , visto que a deficiência de fósforo pode comprometer a assimilação do nitrogênio pela planta, devido a sua influência na síntese de ATP como mencionado.

Além disso, estudos indicam que há um ponto de saturação na assimilação de nitrogênio pelas plantas. Bredemeier e Mundstock (2000) observaram que os processos de absorção e assimilação do nitrogênio são complexos, sendo influenciados por diversos fatores reguladores, como a disponibilidade de energia, a forma química do nitrogênio e o estado fisiológico da planta. A eficiência na assimilação do nitrogênio pode ser comprometida mesmo quando há oferta adequada de nitrato, devido a limitações metabólicas, especialmente em situações de desequilíbrio nutricional. O excesso de fósforo, por exemplo, pode provocar saturação enzimática e resultar no acúmulo de nitrato nos tecidos vegetais, justificando assim o aumento de concentrações de nitrato nas folhas de alface a partir da dose 452 kg ha^{-1} .

Pesquisas realizadas com outras espécies de plantas confirmaram essa relação entre fósforo e níveis de nitrato. Em espinafre (*Spinacia oleracea*), Moura *et al.* (2019) constataram que a aplicação de fertilizante fosfatado na dose recomendada resultou em uma diminuição significativa do teor de nitrato em relação à dose zero e à dose excessiva. De forma semelhante, Souza *et al.* (2020) demonstraram que a aplicação balanceada de fósforo em rúcula (*Eruca sativa*) levou à diluição do nitrato foliar. Isso foi atribuído à maior eficiência na conversão do nitrogênio absorvido em compostos orgânicos.

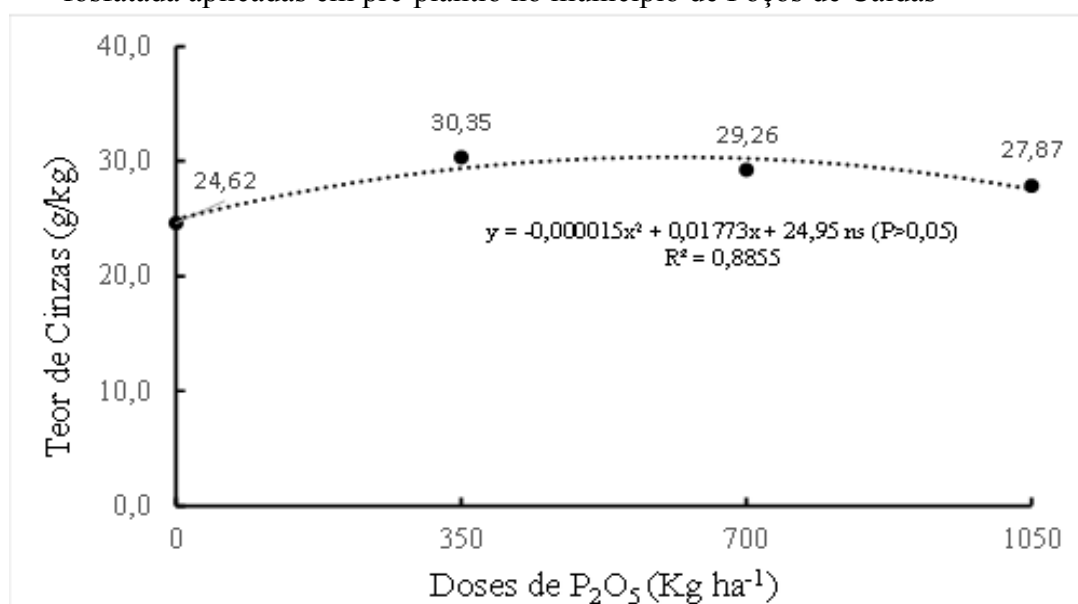
Os níveis de nitrato em tecidos vegetais geram preocupação, não apenas do ponto de vista agrônomo, mas também em relação aos efeitos ambientais e à saúde pública. O consumo prolongado de nitrato pode ter relação com aumento de casos de câncer colorretal, câncer de tireóide, defeitos congênitos do sistema nervoso central e outros desfechos reprodutivos adversos especialmente em pessoas com maior predisposição à nitrosação endógena (Ward *et al.*, 2018).

O manejo inadequado de fertilização, especialmente a fosfatada, não só afeta a eficiência da nutrição das plantas, mas também pode resultar em efeitos adversos para o consumidor e para o meio ambiente. Isso ressalta a necessidade de definir e seguir corretamente a indicação de doses de adubação seguras e adequadas para as culturas não somente de alface, além de novos estudos para melhor compreender este processo.

4.4 FRAÇÕES INORGÂNICAS DO TECIDO VEGETAL (CINZAS)

Não houve diferença estatística significativa entre as doses de P_2O_5 ha^{-1} aplicadas para o teor de cinzas na folha da alface aos 42 dias pós-plantio (Figura 8).

Figura 8- Teores de resíduo mineral-cinzas (g/kg) nas folhas da alface tipo cressa cultivar vera, aos 42 dias pós plantio, sobre efeito de diferentes doses de adubação fosfatada aplicadas em pré-plantio no município de Poços de Caldas



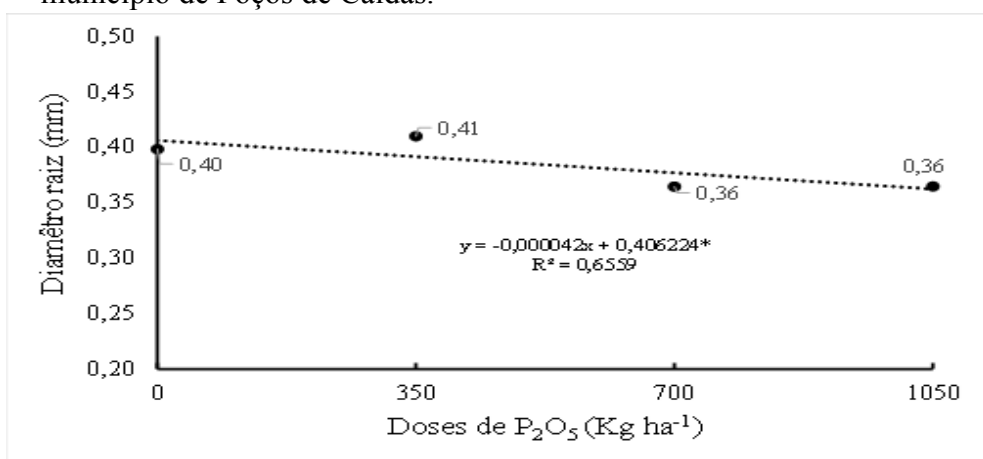
Fonte: Autores (2025).

O teor de cinzas pode ser influenciado por diversos fatores, como desde a cultivar utilizada, bem como à correção e fertilização prévia do solo, que possivelmente pode reduzir a resposta da planta ao fósforo aplicado. Aina *et al.* (2025) observaram que a adição de fertilizantes nem sempre é o principal fator determinante para o acúmulo de nutrientes nos tecidos vegetais. Fatores como a espécie cultivada, o tipo de solo e a demanda fisiológica da planta exercem influência significativa sobre a absorção e redistribuição de nutrientes.

4.5 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DO SISTEMA RADICULAR

Observou-se ajuste linear negativo significativo para o diâmetro médio das raízes da alface (Figura 9) em função das diferentes doses de fósforo aplicadas, estimando-se que a cada incremento em uma unidade na dose aplicada, o diâmetro da raiz diminui em 0,000042 mm.

Figura 9- Diâmetro médio das raízes da alface tipo crespa cultivar vera sobre efeito de diferentes doses de adubação fosfatada aplicadas em pré-plantio, aos 42 dias pós-plantio no município de Poços de Caldas.



Fonte: Autores (2025).

Estudos como o de *Bell, Egon e Olaoye (2024)* sugeriram que o declínio no diâmetro da raiz pode estar relacionado ao aumento da disponibilidade de fósforo. Em concentrações mais baixas, as plantas tendem a desenvolver raízes mais espessas como uma estratégia adaptativa diante do estresse nutricional. Por outro lado, em doses mais elevadas, observa-se uma redução no diâmetro radicular, possivelmente pela menor necessidade de formar estruturas mais desenvolvidas para melhor absorção de nutrientes, já que o fósforo e outros nutrientes estão abundantes no solo. Quando existe a deficiência de nutriente no solo a planta tende a se adaptar para suprir as necessidades nutricionais investindo em conteúdo radicular. *Mantovani et al. (2014)*, também observaram que o fornecimento de fósforo impactou o crescimento radicular, otimizando a absorção de água e nutrientes, o qual afetou diretamente o vigor e a produtividade das plantas.

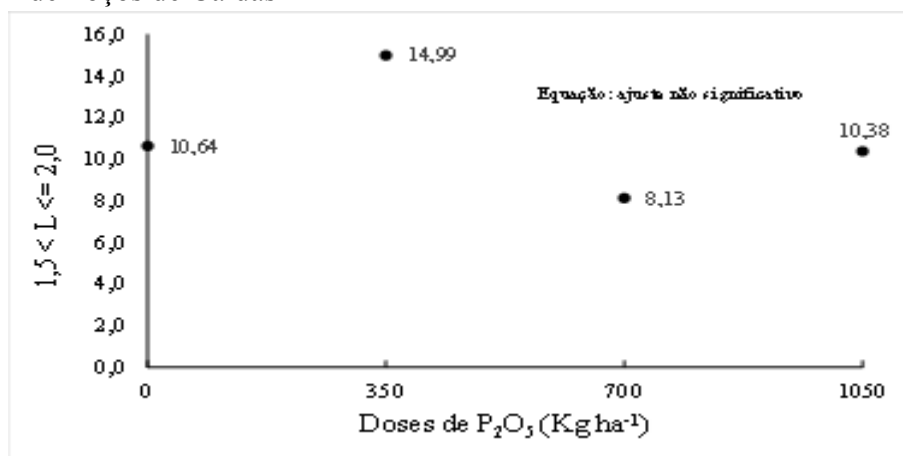
Já *Marschner (2012)* relatou que a adubação fosfatada promove o desenvolvimento do sistema radicular, particularmente em sua espessura, pois está diretamente relacionada à formação de tecidos condutores e ao incremento da atividade meristemática.

4.6 COMPRIMENTO, ÁREA DE SUPERFÍCIE E VOLUME RADICULAR POR CLASSES DE DIÂMETRO

Os gráficos apresentados nas Figuras a seguir, para comprimento, área de superfície e volume de raízes por classes de diâmetro das raízes, no geral indicam um comportamento com ajuste linear negativo significativo ou, então, não obteve-se equação com ajuste estatisticamente significativo.

Para o comprimento radicular (na classe de diâmetro de $1,5 < L \leq 2,0$ mm) não houve ajuste significativo (Figura 10), embora tenha havido diferenças significativas entre as doses, com destaque para a dose de $350 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$.

Figura 10- Comprimento radicular na classe de diâmetro de $1,5 < L \leq 2,0$ mm das raízes da alface tipo crespa cultivar vera aos 42 dias pós-plantio, sobre efeito de diferentes doses de adubação fosfatada aplicadas em pré-plantio no município de Poços de Caldas

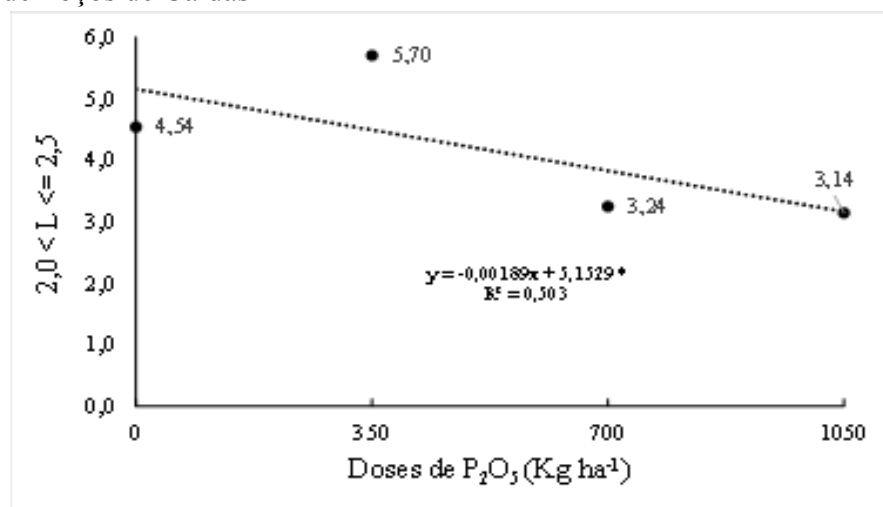


Fonte: Autores (2025).

Essa faixa de diâmetro está associada a raízes que desempenham funções de sustentação e condução. Pesquisas indicam que raízes mais espessas apresentam baixa plasticidade em resposta à fertilização fosfatada. De acordo com *Fageria, Baligar e Jones* (2011), a absorção de fósforo estimula principalmente o crescimento de raízes finas, ao passo que o crescimento de raízes mais espessas está mais relacionado ao desenvolvimento geral da planta do que à disponibilidade imediata de nutrientes.

Para a classe de diâmetro de $2,0 < L \leq 2,5$ mm (Figura 11), a cada incremento de uma unidade em adubação fosfatada houve uma queda em $0,00189$ cm no comprimento radicular.

Figura 11- Comprimento radicular de raízes da alface tipo crespa cultivar Vera na classe de diâmetro de $2,0 < L \leq 2,5$ mm sobre efeito de diferentes doses de adubação fosfatada aplicadas em pré-plantio, aos 42 dias pós-plantio no município de Poços de Caldas

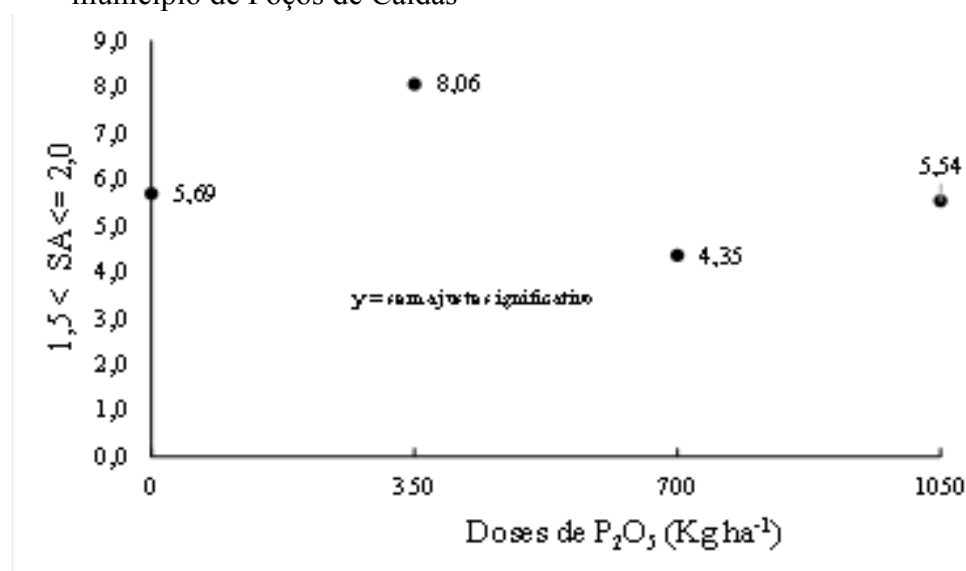


Fonte: Autores (2025).

A redução no comprimento das raízes muito grossas pode estar relacionada à realocação dos recursos da planta, que prioriza raízes mais finas e de maior densidade em vez de promover o espessamento nas raízes mais grossas. Müller *et al.* (2022) afirmaram que altas doses de fósforo favorecem o crescimento de raízes jovens e ramificações, mas diminuem a formação de raízes estruturais mais espessas, o que sugere uma estratégia de eficiência nutricional.

Para a área de superfície na classe de diâmetro de $1,5 < SA \leq 2,0$ mm (Figura 12), houve diferença entre as doses aplicadas porém não houve ajuste significativo de modelos.

Figura 12- Área de superfície radicular em raízes de alface cultivar Vera na classe de diâmetro de $1,5 < SA \leq 2,0$ mm sobre efeito de diferentes doses de adubação fosfatada aplicadas em pré-plantio, aos 42 dias pós-plantio no município de Poços de Caldas

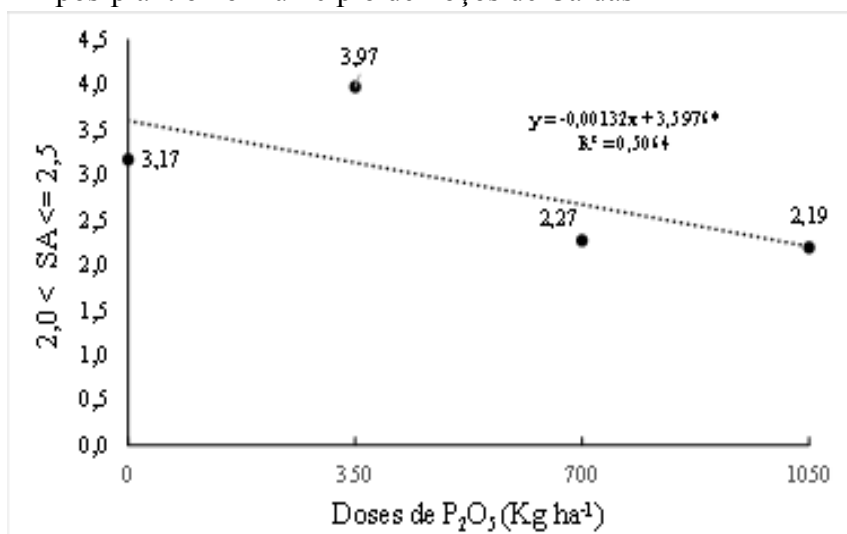


Fonte: Autores (2025).

De acordo com *Williamson et al.* (2001), o fósforo tem um impacto significativo na expansão de raízes laterais finas, enquanto afeta pouco as raízes mais velhas e grossas, que já possuem uma estrutura estabelecida. Observa-se na dose de referência ($350\ kg\ P_2O_5\ ha^{-1}$) uma superioridade em relação às demais. Portanto, raízes desta classe de diâmetro têm uma resposta limitada em ampliar a área de superfície a partir de aumentos mais expressivos de adubação fosfatada, notadamente em culturas de ciclo curto como a cultura da alface.

Para a área de superfície na classe de diâmetro de $2,0 < SA \leq 2,5$ mm (Figura 13), houve diferença entre as doses aplicadas e, diferentemente da classe anterior, com ajuste linear negativo significativo. A cada incremento em uma unidade na dose de adubação fosfatada estimou-se uma queda em $0,00132\ cm^2$ nesta classe.

Figura 13:- Área de superfície radicular em raízes de alface tipo crespa cultivar Vera na classe de diâmetro de $2,0 < SA \leq 2,5$ mm sobre efeito de diferentes doses de adubação fosfatada aplicadas em pré-plantio, aos 42 dias pós-plantio no município de Poços de Caldas

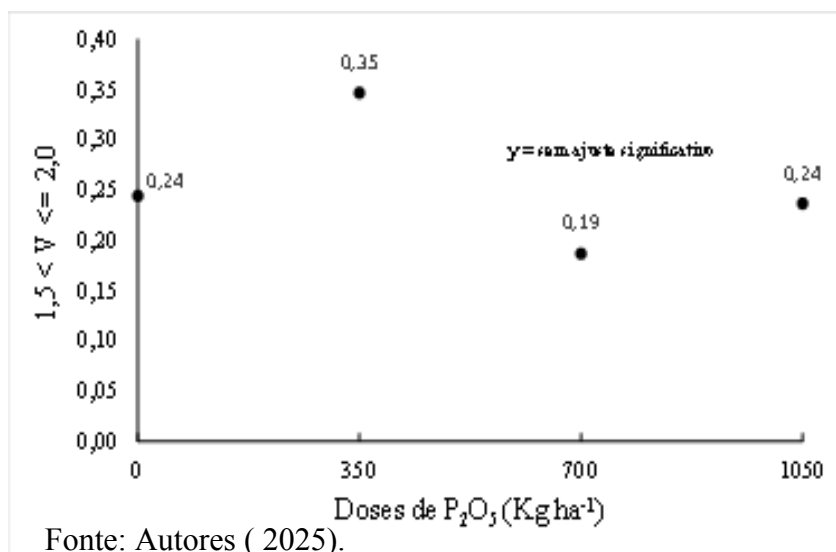


Fonte: Autores (2025).

Esse resultado sugere que raízes muito espessas têm seu crescimento restringido quando expostas a altas concentrações de fósforo. Segundo *Zhu et al.* (2005), em ambientes com alta disponibilidade de fósforo, as plantas diminuem o investimento em raízes profundas e concentram-se no crescimento superficial. Isso pode justificar a redução da área de superfície dessas raízes, uma vez que sua formação se torna menos benéfica do ponto de vista metabólico em solos que já estão adequadamente supridos em P.

Para o volume de raízes na classe de diâmetro de $1,5 < V \leq 2,0$ mm (Figura 14), houve diferença entre as doses de P, porém sem ajuste de modelo de tendência significativa.

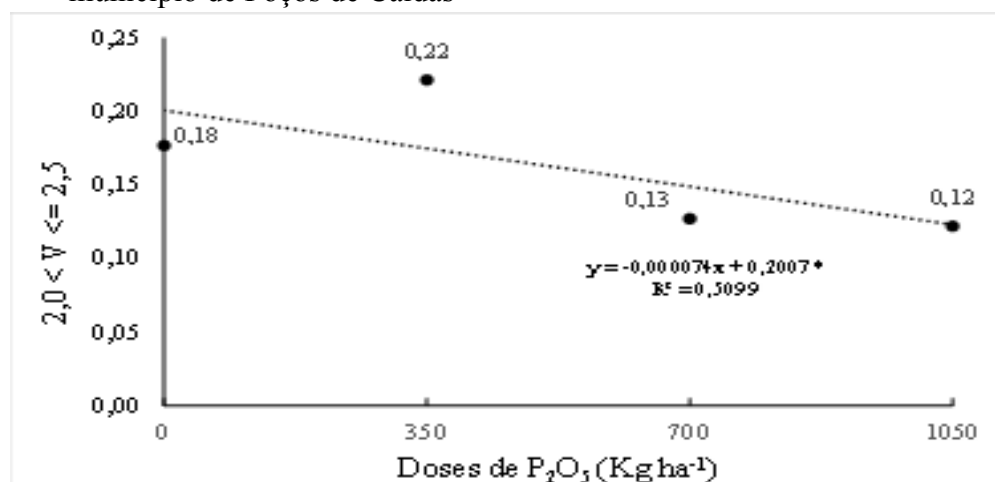
Figura 14- Volume radicular em raízes de alface tipo crespa cultivar Vera na classe de diâmetro de $1,5 < V \leq 2,0$ mm sobre efeito de diferentes doses de adubação fosfatada aplicadas em pré-plantio, aos 42 dias pós-plantio no município de Poços de Caldas



O volume das raízes nesta classe não apresentou uma tendência de resposta significativa ao aumento da aplicação de fósforo, porém verificou superioridade também para a dose padrão de $350\ kg/ha\ P_2O_5\ ha^{-1}$. Jungk (2001) constatou que, em culturas de rápido crescimento como a alface, o fósforo influencia principalmente a quantidade e o comprimento das raízes finas, ao passo que o volume total das raízes estruturais permanece relativamente constante.

Já para o volume na classe de diâmetro de $2,0 < V \leq 2,5$ mm (Figura 15), houve diferença entre as doses, com ajuste de modelo linear negativo significativo, queda em volume de $0,000074 \text{ cm}^3$ para cada unidade de incremento em doses de fósforo.

Figura 15- Volume radicular em raízes de alface tipo crespa cultivar Vera na classe de diâmetro de $2,0 < V \leq 2,5$ mm sobre efeito de diferentes doses de adubação fosfatada aplicadas em pré-plantio, aos 42 dias pós-plantio no município de Poços de Caldas



Fonte: Autores (2025).

As doses mais baixas apresentaram volumes radiculares mais altos, nesta classe de diâmetro, indicando que o excesso de fósforo pode inibir o desenvolvimento dessas estruturas. Segundo *Lynch* (1995), a formação de raízes grossas demanda mais carbono e energia, sendo controlada por sinais de disponibilidade ou falta. Quando há abundância de fósforo, a planta limita o desenvolvimento de estruturas dispendiosas, como raízes espessas, priorizando raízes de baixo custo que apresentam maior eficiência na absorção. Mais uma vez, observou-se superioridade nesta classe para a aplicação de $350 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$.

5 CONCLUSÃO

A adubação fosfatada aplicada no preparo dos canteiros em pré-plantio não promove incremento em produtividade na Alface tipo crespa cultivar Vera em um ciclo inicial de cultivo com 42 dias. Entre os parâmetros morfométricos da cabeça, altura e diâmetro, apenas a altura responde linearmente a doses de P aplicadas até a dose de 1050 kg P₂O₅ ha⁻¹.

A adubação fosfatada altera os teores de nitrato na folha da alface tipo crespa cultivar vera até a dose de 452 kg de P₂O₅ ha⁻¹. Já os teores de cinzas não são influenciados pela adubação fosfatada até a aplicação de 1050 kg de P₂O₅ ha⁻¹ em um ciclo inicial de 42 dias de cultivo. Quanto à morfologia do sistema radicular, a dose de 350 kg de P₂O₅ ha⁻¹ influencia a maioria dos parâmetros, diâmetro, área de superfície e volume.

Este estudo destaca que a adubação fosfatada sobre a cultura da alface tipo crespa cultivar vera, não pode ser focado única e exclusivamente na ótica de aspectos produtivos, mas também sobre a qualidade nutricional do produto colhido e alterações morfológicas radiculares na planta que podem auxiliar no entendimento da nutrição mineral como um todo. Assim, a busca por manejo eficiente da adubação fosfatada, conforme demonstrado, constitui-se em uma abordagem que aponta para o gerenciamento eficaz do sistema produtivo, alinhando a produção de alimentos com segurança nutricional e de forma ambientalmente sustentável.

REFERÊNCIAS

AINA, Olawole E. et al. **Evaluation of Mineral Contents of Lettuce and Carrot Harvested from Soil Treated with Organic and Inorganic Fertilizers**. *Agriculture*, [S.L.], v. 15, n. 6, p. 656, 20 mar. 2025. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture15060656>. Acesso em : 20 de Mar. 2025.

ALAHY, A. et al. **Effect Of Phosphorus And Plant Spacing On The Growth And Yield Of Lettuce**. *Advance In Agriculture And Biology*, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 1-7, 20 abr. 2014. Progressive Science Publications. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/309734320_Effect_Of_Phosphorus_And_Plant_Spacing_On_The_Growth_And_Yield_Of_Lettuce>. Acesso em: 27 jan. 2025.

BATISTA, M.A., INOUE, T.T., ESPER NETO, M., and MUNIZ, A.S. **Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral**. In: BRANDÃO FILHO, J.U.T., FREITAS, P.S.L., BERIAN, L.O.S., and GOTO, R., comps. *Hortaliças-fruto* [online]. Maringá: EDUEM, 2018, pp. 113-162. ISBN: 978-65-86383-01-0. Disponível em: <<https://books.scielo.org/id/bv3jx/pdf/brandao-9786586383010-06.pdf>>. Acesso em: 30 jan. 2025.

BELL, Chris; EGON, Axel; OLAOYE, Favour. **Plant Root Architecture and Nutrient Acquisition — EasyChair Preprint nº 14779**. 11 p., 10 set. 2024. Disponível em: <https://easychair.org/publications/preprint/H9QD/open>. Acesso em: 24 nov. 2025.

BENINNI, E. R. Y.; TAKAHASHI, H. W.; NEVES, C. S. V. J.; FONSECA, I. C. B. **Teor de nitrato em alface cultivada em sistemas hidropônico e convencional**. *Horticultura Brasileira*, v. 20, n. 2, p. 183-186, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hb/a/7Z7XnwcDzCmk4jRVc348yLk/>. Acesso em: 12/01/2025.

BERTOSSI, Ana Paula Almeida et al. **Nutritional Efficiency of Phosphorus in Lettuce**. *Journal of Agricultural Science*, [S.L.], v. 5, n. 8, p. 125-131, 15 jul. 2013. Canadian Center of Science and Education. <http://dx.doi.org/10.5539/jas.v5n8p125>. Disponível em: <file:///C:/Users/letic/Downloads/27287-97309-1-PB.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2025.

BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C. M. **Regulação da absorção e assimilação do nitrogênio nas plantas**. *Ciência Rural*, v. 30, n. 2, p. 365–372, 2000. DOI: 10.1590/S0103-84782000000200029. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/6rzG8Z2Q6yqCCpt5TR1f9Rw/>. Acesso em: 21 mar. 2025.

BOSCHIERO, Beatriz Nastaro. *Superfosfato triplo, superfosfato simples, MAP e DAP*. **Agroadvance**, 10 nov. 2023. Disponível em: <https://agroadvance.com.br/blog-superfosfato-simples-triplo-map-e-dap/>. Acesso em: 22/2/2025.

CARVALHO, H. W. P.; MOREIRA, L. A. **Nutrição mineral de plantas**. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/8034985/mod_resource/content/1/Nutricao%20Mineral%20de%20Plantas_GEFEN.pdf. Acesso em: 6 jan. 2024.

CETESB. **Nitrato e nitrito**. São Paulo, 2022. Disponível em:
<https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2022/12/Nitrato-e-Nitrito.pdf>
. Acesso em: 11 fev. 2025.

CIRINO, Ednaldo et al. **O Uso De Fertilizantes E Seus Impactos Ambientais**. 2008. 10 f. TCC (Graduação) - Curso de S/C, Etec Benedito Storani, Jundiaí, 2008. Disponível em:
https://ric.cps.sp.gov.br/bitstream/123456789/6770/1/tecnicoemqu%C3%ADmica_2021_2_ednaldocirino_ousodefertilizanteseseusimpactosambientais.pdf. Acesso em: 10 fev. 2025.

CORRÊA, C. V. et al. **A produção de alface cresce em função de diferentes coberturas de solo e doses de adubação P₂O₅**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 22, n. 3, p. 206–211, 2018. Disponível em:
<https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n3p206-211>. Acesso em: 11 ago. 2025.

CRUVINEL, Camila Ramos. **Eficiência agrônômica de tecnologias de fertilizantes na adubação fosfatada**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia (UFU), 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia). Disponível em:
<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/45894> repositorio.ufu.br Acesso em: 12/1/2025.

DESAFIOS enfrentados na produção de hortaliças devido às altas temperaturas. **Revista Cultivar**. Disponível em:
<https://revistacultivar.com.br/artigos/desafios-enfrentados-na-producao-de-hortalicas-devido-a-altas-temperaturas>. Acesso em: 8 jan. 2025.

YOUNIS, T. M.; ABD-ELRAHMAN, S. H.; ABD-RABBO, M. A. A. **Equilibrium content between nitrogen and phosphorus for lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown in a clay soil**. Egyptian Journal of Soil Science, Cairo, v. 61, n. 2, p. 275–286, jun. 2021. DOI: 10.21608/ejss.2021.86184.1458. Disponível em:
https://ejss.journals.ekb.eg/article_189528_b54ce0c99b2dfceab754a69dabbd05ba.pdf. Acesso em: 24 nov. 2025.

EMBRAPA (Distrito Federal). **Brasil em 50 alimentos**. Brasília: Teixeira Gráfica e Editora, 2023. 359 p. Disponível em:
<file:///C:/Users/14613144612/Downloads/BRASIL-50-ALIMENTOS.pdf>. Acesso em: 09 jan. 2025.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. **Growth and mineral nutrition of field crops**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. ISBN 978-1-4398-1695-0.

FELIPPE, L. C. V.; PEREIRA, C. O. Teor de nitrato em alfaces do tipo crespa (*Lactuca sativa*) provenientes de diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Processos Químicos**, v. 1, n. 1, p. 1–58, 2020. Disponível em: *fornecer link público válido*. Acesso em: 11 fev. 2025.

FERREIRA, D. F. SISVAR: **sistema de análise estatística**. Lavras: UFLA, 2011.

GOMES, F. T. L. Nutrição do alface deve seguir cada fase do ciclo. **Revista Campo & Negócios**, 2024. Disponível em:

<https://revistacampoenegocios.com.br/nutricao-do-alface-deve-seguir-cada-fase-do-ciclo/>. Acesso em: 26 nov. 2024..

GOMES JUNIOR, F. A.; PEREIRA, B. L. S.; SILVA, M. G.; SOARES, T. M. Sintomatologia de deficiência de macronutrientes em plantas de alface. **Informe Econômico**, v. 38, n. 1, p. 1–10, 2020. DOI: 10.26694/1517-6258.280. Acesso em: 17 jan. 2024.

GSA. **Nutri-Facts Brasil**. Disponível em:

<https://www.npct.com.br/publication/nutrifacts-brasil.nsf/book/NUTRIFACTS-BRASIL-2/>. Acesso em: 10 fev. 2025.

GUELFY, D.; NUNES, A. P. P.; SARKIS, L. F.; OLIVEIRA, D. P. **Innovative phosphate fertilizer technologies to improve phosphorus use efficiency in agriculture**. *Sustainability*, v. 14, p. 14266, 2022. DOI: **10.3390/su142114266**. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su142114266>

HAMMOND, J. P.; WHITE, P. J. *Sucrose transport in the phloem: integrating root responses to phosphorus starvation*. *Journal of Experimental Botany*, v. 59, n. 1, p. 93–109, 2008. DOI: 10.1093/jxb/erm221.

HANSEL, F. D. et al. Influence of different phosphorus sources on fertilization efficiency. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v. 7, n. 1, p. 103–111, 2014. DOI: 10.5935/paet.v7n1.12.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção de alface no Brasil em 2017**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/alface/br>. Acesso em: 22 jul. 2025.

JIAO, W. et al. Environmental risks of trace elements associated with long-term phosphate fertilizers applications: a review. **Environmental Pollution**, v. 168, p. 44–53, 2012.

JUNGK, A. Root hairs and the acquisition of plant nutrients from soil. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 164, n. 2, p. 121–129, 2001..

JOLLIFFE, I. T.; CADIMA, J. Principal component analysis: a review and recent developments. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**, v. 374, p. 20150202, 2016. DOI: 10.1098/rsta.2015.0202.

KARWOWSKA, M.; KONONIUK, A. Nitrates/Nitrites in food—risk for nitrosative stress and benefits. **Antioxidantes**, v. 9, n. 3, p. 241, 2020. DOI: 10.3390/antiox9030241.1.

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, n. 2, p. 19–34, 2016.

KUNWAR, V. S. et al. Estratégias para melhorar a disponibilidade de P₂O₅ em um sistema agrícola sustentável. **International Journal of Innovative Science and Research Technology**, v. 3, n. 9, p. 325–331, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/328172358_Strategies_to_Improve_Phosphorus_Availability_in_A_Sustainable_Agricultural_System. Acesso em: 27 mar. 2025.

LANA, R. M. Q. et al. Produção da alface em função do uso de diferentes fontes de P_2O_5 em solo de Cerrado. **Horticultura Brasileira**, v. 22, n. 3, p. 525–528, 2004.

LIMA, V. B.; PAIVA, C. E. C.; ANDRADE, F. V. **O Uso Do P_2O_5 Remanescente Como Interpretação Da Textura Do Solo: Um Equívoco!** Disponível em: <https://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2024/anais/arquivos/0299_1126_01.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2025.

LINS, M. **Como aumentar a eficiência da adubação P_2O_5 ?** Disponível em: <<https://revistacampoenegocios.com.br/como-aumentar-a-eficiencia-da-adubacao-P2O5/>>. Acesso em: 31 jan. 2025.

LYNCH, J. P. (1995). *Root Architecture and Plant Productivity*. **Plant Physiology**, **109** (1), 7-13

LLOYD, Shaun. World leaders in lettuce production. Ripley Believes, 2013. Disponível em: <<https://pt.ripleybelieves.com/world-leaders-in-lettuce-production-5726>>. Acesso em: 22 jul. 2025.

MABAGALA, Frank Stephano; MNG'ONG'O, Marco E.. On the tropical soils; The influence of organic matter (OM) on phosphate bioavailability. *Saudi Journal Of Biological Sciences*, [S.L.], v. 29, n. 5, p. 3635-3641, maio 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.02.056>.

MACHADO, Bianca de Almeida. **Reações do P_2O_5 no solo e práticas para minimizar efeitos**. 2021. Disponível em: <https://agroadvance.com.br/blog-reacoes-do-fosforo-no-solo-e-praticas/>. Acesso em: 19 dez. 2024.

MACHADO, V. J.; SOUZA, C. H. E. de. Disponibilidade de P_2O_5 em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de P_2O_5 monoamônico de liberação lenta. **Bioscience Journal**, Uberlândia, MG, v. 28, n. 1, p. 1–7, 2012. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/12413>. Acesso em: 30 jan. 2025.

MANTOVANI, José Ricardo; OLIVEIRA, Igor Arthur da Costa; MARQUES, Douglas José; SILVA, Adriano Bortolotti da; LANDGRAF, Paulo Roberto Corrêa. Teores de P_2O_5 no solo e produção de alface crespa em função de adubação P_2O_5 . **Semina: Ciências Agrárias**, [S.L.], v. 35, n. 4, p. 2369, 4 set. 2014. Universidade Estadual de Londrina. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2014v35n4suplp2369>.

MARSCHNER, P. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3rd ed. London: **Academic Press**, 2012.

MEDEIROS, J. C. et al. Fertilizantes P_2O_5 e impactos ambientais em sistemas intensivos de produção. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 14, n. 4, p. 688–695, 2019.

MOTA, José H. et al. Produção de alface americana em função da aplicação de doses e fontes de P_2O_5 . **Horticultura Brasileira**, [S.L.], v. 21, n. 4, p. 621-622, dez. 2003. FapUNIFESP (SciELO).

MOURA, L. M. et al. **Efeito de fontes e doses de P_2O_5 sobre o teor de nitrato em espinafre**. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, v. 14, n. 3, p. 1–7, 2019.

MÜLLER, F. M. et al. **Root architecture and phosphorus uptake efficiency in leafy vegetables**. Scientia Horticulturae, v. 292, 2022.

NASCIMENTO, A. S., SILVA, R. H., ECHER, M. M., COUTINHO, P. W. R., & KLEIN, D. K. (2021). Desempenho produtivo e bioquímico de alface crespa sob diferentes ambientes de cultivo. **Scientia Plena**, 17(11), e491101. <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2021.491101>

NOVAIS, R. et al. **Fósforo no solo e na planta**. Viçosa: SBCS, 2007.

OEC. **Alface**. Disponível em: <https://oec.world/en/profile/hs/lettuce>. Acesso em: 08 jan. 2024.

OREGON State University . **Best Management Practices for Fertilization**. Disponível em: <<https://agsci.oregonstate.edu/mes/sustainable-onion-production/best-management-practices-fertilization>>.

PEDRINHO, DR.; BIMBATO, S.M.; BONO, JAM.; MATIAS, . R.; AGUIAR, EB.; ARAÚJO, GM de.; SAUER, AV; OLIVEIRA, A. da S. **Teor de nitrato em alface cultivada em diferentes sistemas de produção**. Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento , [S. l.] , v. 3, pág. e9210313049, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i3.13049. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/13049>. Acesso em: 11 fev. 2025.

PRAÇA, Nayara Maria Pedrosa. **Frações De P_2O_5 Em Solos De Climas Tropicais Em Função Do Intemperismo**. 2023. 111 f. tese (doutorado) - curso de doutorado em produção vegetal, universidade estadual do norte fluminense darcy ribeiro, campos dos goytacazes, 2024. disponível em: <https://uenf.br/posgraduacao/producao-vegetal/wp-content/uploads/sites/10/2024/10/nayara.pdf>. acesso em: 27 mar. 2025.

RAGHOTHAMA, K. G. Phosphate acquisition. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 50, p. 665–693, 1999.

ROBERTS, Terry L.; JOHNSTON, A. Edward. **Phosphorus use efficiency and management in agriculture**. Resources, Conservation And Recycling, [S.L.], v. 105, p. 275-281, dez. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.09.013>.

SHARPLEY, A. et al. Phosphorus mobility in soil and water. **Soil Science Society of America Journal**, 2013.

SILVA, J. L. **O papel da fertilização na nutrição das plantas**. Disponível em: <<https://www.gecal.com.br/o-papel-da-fertilizacao-na-nutricao-das-plantas>>. Acesso em: 15 jan. 2025.

SMITH, V. H.; SCHINDLER, D. W. **Eutrophication science: where do we go from here?** Trends in Ecology & Evolution, v. 24, n. 4, p. 201–207, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.11.009>. Acesso em: 11 ago. 2025.

SOUZA, Antônio Eleutério de. **Balanco Mineral Brasileiro**. 2010. Disponível em: [https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/dnmp/paginas/balanco-mineral/arquivos/balaWARnco-mineral-brasileiro-2001-P₂O₅](https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/dnmp/paginas/balanco-mineral/arquivos/balaWARnco-mineral-brasileiro-2001-P2O5). Acesso em: 26 nov. 2024.

SOUZA, K. A. et al. **Teor de nitrato em rúcula cultivada sob diferentes doses de P₂O₅**. Horticultura Brasileira, v. 38, p. 90–95, 2020.

SOUZA, M. A. et al. **Doses de P₂O₅ e cobertura morta na produtividade de alface americana**. Revista Caatinga, Mossoró, v. 33, n. 2, p. 406–415, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n213rc>. Acesso em: 11 ago. 2025.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TAMELINI, Bruno Rocha et al. **Sources and Doses of Phosphorus in the Production of Red-Leaf Lettuce in an Organic Farming System**. *Brazilian Archives Of Biology And Technology*, [S.L.], v. 67, n. 8, p. 1-10, 2024. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4324-2024230761>.

TMF : **P₂O₅ para plantas: como aproveitar o nutriente retido no solo?** Disponível em: <<https://tmffertilizantes.com.br/fosforo-para-plantas-como-aproveitar-o-nutriente-retido-no-solo/>>. Acesso em: 12 ago. 2025

VÉZINA, L.; BONAMI, J. **Colorimetric nitrate determination**. *Analytical Biochemistry*, 1975

VIVIANI, C. A. et al. **Disponibilidade de P₂O₅ em dois latossolos argilosos e seu acúmulo em plantas de soja, em função do aumento do pH**. Ciência e Agrotecnologia, v. 34, n. 1, p. 61–67, fev. 2010.

WARD, Mary et al. **Drinking Water Nitrate and Human Health: an updated review**. International Journal Of Environmental Research And Public Health, [S.L.], v. 15, n. 7, p. 1557, 23 jul. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph15071557>.

WILLIAMSON, L. C. et al. **Phosphate availability regulates root system architecture**. Plant Physiology, v. 126, p. 875–882, 2001.

ZHANG, Y.; ZHAO, J.; WANG, X.; et al. **Phosphorus nutrition contributes to nitrate assimilation and root development in plants**. Journal of Experimental Botany, v. 72, n. 4, p. 1125–1138, 2021.

ZIECH, Ana R. D. et al. Cultivo de alface em diferentes manejos de cobertura do solo e fontes de adubação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 18, n. 9, p. 948-954, set. 2014. Fap UNIFESP (SciELO). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n09p948-954>. Acesso em: 8 Ago. 2025.

ZONTA, E. et al. **Fertilizantes minerais, orgânicos e organominerais**. [s.l.: s.n.]. 2015. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1134679/1/cap14-livro-RecommendacaoCalagemAdubacao-AnaLuciaBorges-AINFO.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2025

ZHU, J. et al. **Phosphorus and root architecture in soybean.** *Plant and Soil*, v. 270, p. 249–257, 2005.