



Universidade Federal de São Carlos
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
Curso de Engenharia Agrônoma



Vitor Hugo Silva de Lucena

**APLICAÇÃO FOLIAR DE DIFERENTES FONTES DE MAGNÉSIO E
INTERAÇÃO ENTRE ABSORÇÃO E PARTIÇÃO EM CITROS**

ARARAS - 2025



Universidade Federal de São Carlos
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
Curso de Engenharia Agrônoma



Vitor Hugo Silva de Lucena

**TÍTULO DO TRABALHO: APLICAÇÃO FOLIAR DE
DIFERENTES FONTES DE MAGNÉSIO E INTERAÇÃO ENTRE
ABSORÇÃO E PARTIÇÃO EM CITROS**

Monografia apresentada ao Curso de
Engenharia Agrônoma – CCA – UFSCar para a
obtenção do título de Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. Evandro Henrique Schinor
Co-orientador: Rafael Miranda de Lima Carvalho

ARARAS – 2025

Dedico este trabalho à minha família, meus colegas de república e ao Centro de Citricultura Sylvio Moreira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares e colegas pelo apoio durante todo este período acadêmico e por acreditarem em minha capacidade, contribuindo para a minha resiliência perante às atribuições na faculdade. Assim como também, meus agradecimentos ao IAC de Cordeirópolis e a todos os membros do Laboratório de Fisiologia e Nutrição (Lab NUTRIFIS) na minha formação no âmbito da pesquisa.

“A vida só pode ser comprendida olhando-se para trás, mas só pode ser vivida olhando-se para a frente”

Soren Klerkegaard

RESUMO

O projeto objetivou avaliar a interação entre a absorção e a partição de magnésio (Mg) em diferentes disponibilidades do nutriente sob diferentes fontes em cultivo protegido no Centro de Citricultura Sylvio Moreira, utilizando-se mudas de laranja 'Pêra' [*Citrus x sinensis* (L.) Osbeck] enxertada em tangerina Sunki [*Citrus x sunki* Hort. ex Tanaka]. O experimento foi disposto em tratamentos compostos por sulfato de magnésio ($MgSO_4$) e nitrato de magnésio ($Mg(NO_3)_2$) em doses baixa (125 mg L^{-1}), adequada (500 mg L^{-1}) e alta (2000 mg L^{-1}) em um esquema fatorial duplo inteiramente casualizado, com cinco repetições. E a utilização do fosfito de magnésio ($Mg_3(PO_3)_2$), em dose adequada única (500 mg L^{-1}) no delineamento inteiramente casualizado, com cinco repetições de cada tratamento. A aplicação de Mg referente aos diferentes delineamentos utilizados, foi realizada via pulverização foliar, apresentando um intervalo trimestral entre as três aplicações. Iniciou-se as análises após a emissão do primeiro fluxo vegetativo, realizando-se as medições de teor de clorofila (SPAD), fluorimétrica e a coleta de folhas após um dia da aplicação para preparação do extrato enzimático e posterior quantificação das enzimas (superóxido dismutase (SOD, EC 1.15.1.1), catalase (CAT, EC 1.11.1.6) e peroxidase (POD, EC 1.11.1.7). Destacando-se a elevada resposta das enzimas CAT e POX na dose 2000 mg L^{-1} da fonte sulfato. Portanto, conclui-se que aplicações foliares sob alta concentração de Mg, promove ativação das atividades enzimáticas (CAT e POX) e garantia de aparato fotossintético eficiente, reduzindo as espécies reativas de oxigênio (ERO's) e o conteúdo de malondialdeído (MDA).

Palavras-chave: marcadores bioquímicos; atividade enzimática; aparato fotossintético; parâmetros fluorimétricos

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Disposição das plantas de laranja Pêra enxertadas em tangerineira Sunki plantadas em vasos de 12 L com substrato empobrecido em magnésio (Cordeirópolis, SP, 2023). 18
- Figura 2. Cobertura das plantas de laranja Pêra após a aplicação foliar de diferentes fontes e doses de magnésio (Mg). 20
- Figura 3: Rendimento fotossintético de plantas de laranja Pêra sob diferentes fontes e doses de Mg. Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. A: fração de luz dedicada ao quenching não fotoquímico; B: rendimento do PSII; C: fração de luz perdida via processos inibidores de fotossíntese não regulados e D: fração de luz dedicada ao quenching não fotoquímico. 22
- Figura 4: Rendimento fotossintético de plantas de laranja Pêra sob diferentes fontes e doses de Mg. Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. A: fração de luz dedicada ao quenching não fotoquímico; B: rendimento do PSII; C: fração de luz perdida via processos inibidores de fotossíntese não regulados e D: fração de luz dedicada ao quenching não fotoquímico. 23
- Figura 5: Rendimento fotossintético de plantas de laranja Pêra sob diferentes fontes e doses de Mg. Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. A: fração de luz dedicada ao quenching não fotoquímico; B: rendimento do PSII; C: fração de luz perdida via processos inibidores de fotossíntese não regulados e D: fração de luz dedicada ao quenching não fotoquímico. 24
- Figura 6: Teor indireto de clorofila em plantas de laranja Pera sob diferentes fontes e doses de Mg (primeira coleta). Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. 25
- Figura 7: Teor indireto de clorofila em plantas de laranja Pera sob diferentes fontes e doses de Mg (segunda coleta) Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. 26
- Figura 8: Teor indireto de clorofila em plantas de laranja Pera sob diferentes fontes e doses de Mg (terceira coleta) Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. 26
- Figura 9: Quantificação da atividade enzimática e peroxidação lipídica em plantas de laranja Pera sob diferentes fontes e doses de Mg (primeira coleta). Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. A: Catalase; B: Superóxido dismutase; C: Peroxidase e D: Peroxidação lipídica... 27
- Figura 10: Quantificação da atividade enzimática e peroxidação lipídica em plantas de laranja Pera sob diferentes fontes e doses de Mg (segunda coleta). Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. A: Catalase; B: Superóxido dismutase; C: Peroxidase e D: Peroxidação lipídica... 28
- Figura 11: Quantificação da atividade enzimática e peroxidação lipídica em plantas de laranja Pera sob diferentes fontes e doses de Mg (terceira coleta). Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. A: Catalase; B: Superóxido dismutase; C: Peroxidase e D: Peroxidação lipídica... 29
- Figura 12: Rendimento fotossintético em plantas de laranja Pera sob diferentes fontes de Mg (primeira coleta). Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. A: fração de luz dedicada ao quenching não fotoquímico; B: rendimento do PSII; C: fração de luz perdida via processos inibidores de fotossíntese não regulados e D: fração de luz dedicada ao quenching não fotoquímico. 30
- Figura 13: Rendimento fotossintético em plantas de laranja Pera sob diferentes fontes de Mg (segunda coleta) Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. A: fração de luz dedicada

ao quenching não fotoquímico; B: rendimento do PSII; C: fração de luz perdida via processos inibidores de fotossíntese não regulados e D: fração de luz dedicada ao quenching não fotoquímico. 31

Figura 14: Rendimento fotossintético em plantas de laranja Pera sob diferentes fontes de Mg (terceira coleta) Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. A: fração de luz dedicada ao quenching não fotoquímico; B: rendimento do PSII; C: fração de luz perdida via processos inibidores de fotossíntese não regulados e D: fração de luz dedicada ao quenching não fotoquímico. 32

Figura 15: Teor indireto de clorofila em plantas de laranja Pera sob diferentes fontes de Mg (primeira coleta) Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. 33

Figura 16: Teor indireto de clorofila em plantas de laranja Pera sob diferentes fontes de Mg (segunda coleta). Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. 34

Figura 17: Teor indireto de clorofila em plantas de laranja Pera sob diferentes fontes de Mg (terceira coleta). Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. 34

Figura 18: Quantificação da atividade enzimática e peroxidação lipídica de laranja Pera sob diferentes doses de Mg (primeira coleta). Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. A: Catalase; B: Superóxido dismutase; C: Peroxidase e D: Peroxidação lipídica. 35

Figura 19: Quantificação da atividade enzimática e peroxidação lipídica de laranja Pera sob diferentes doses de Mg (segunda coleta). Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. A: Catalase; B: Superóxido dismutase; C: Peroxidase e D: Peroxidação lipídica. 36

Figura 20: Quantificação da atividade enzimática e peroxidação lipídica de laranja Pera sob diferentes doses de Mg (terceira coleta). Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. A: Catalase; B: Superóxido dismutase; C: Peroxidase e D: Peroxidação lipídica. 37

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1. Fontes e doses de magnésio (Mg) aplicadas via foliar em plantas de laranjeira 'Pêra' 19
- Tabela 2. Fontes e doses de magnésio (Mg) aplicadas via foliar em plantas de laranjeira 'Pêra' 19
- Tabela 3. Massa seca de caule velho (MSCV), folha velha (MSFV), caule novo (MSCN), folha nova (MSFN), raiz (MSR) e total (MST) em plantas de laranjeira 'Pêra' enxertada em tangerineira Sunki submetidas a aplicação foliar de diferentes fontes de magnésio (Mg)..... 38
- Tabela 4. Porcentagem de magnésio no caule velho (MGCV), folha velha (MGFV), caule novo (MGCN), folha nova (MGFN), raiz (MGR) e total (MGT) em plantas de laranjeira doce 'Pêra' sob porta enxerto Tangerina Sunki submetidas a aplicação foliar de diferentes fontes de magnésio (Mg). 38
- Tabela 5. Quantidade de magnésio no caule velho (MGCV), folha velha (MGFV), caule novo (MSCN), folha nova (MGFN), raiz (MGR) e total (MGT) em plantas de laranjeira doce 'Pêra' sob porta enxerto Tangerina Sunki submetidas a aplicação foliar de diferentes fontes de magnésio (Mg). 39

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1 Alterações fisiológicas induzidas pela atuação do Mg em plantas cítricas	13
2.1.1. Crescimento da planta e alocação de biomassa	14
2.1.2 Atividade fotossintética	15
2.1.4 Particionamento de fotossíntese da fonte ao dreno	15
2.1.5 Alteração ultraestrutural e dano oxidativo	16
3. OBJETIVOS	17
3.1. Objetivo geral.....	17
3.2 Objetivos específicos.....	17
4. MATERIAL E MÉTODOS	18
4.1 Material vegetal e instalação do experimento	18
4.2. Parâmetros bioquímicos e fisiológicos das plantas.....	20
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5.1. Análises fluorimétricas dos tratamentos em delineamento fatorial	22
5.1.1. Índice SPAD.....	25
5.1.2. Análises de enzimas antioxidantes e ERO's	27
5.2. Análises fluorimétricas dos tratamentos em delineamento inteiramente casualizado	29
5.2.1. Índice SPAD.....	32
5.2.2. Análises de enzimas antioxidantes e ERO's	35
5.3. Quantidade de massa seca por secção de planta	37
6. CONCLUSÃO	40
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41

1. INTRODUÇÃO

O atual contexto na qual a citricultura está inserida, é baseado na busca por estratégias que elevem a produtividade e a qualidade dos frutos, atrelado ao fornecimento de adubação adequada às plantas cítricas, sendo a China considerada o país com a maior produtividade de citros no mundo (Chen *et al.*, 2020). No Brasil, os pomares citrícolas estão localizados no “cinturão citrícola” em uma área que abrange aproximadamente 460 mil hectares, localizado no Estado de São Paulo e no Triângulo/Sudoeste de Minas Gerais (FUNDECITRUS, 2025). O Brasil é atualmente o maior produtor mundial de laranja, fato que demonstra a importância do setor agrícola nacional. Destaca-se, também, que a receita das exportações do suco de laranja aos Estados Unidos, aumentaram em 13% na temporada 2025/26 (CEPEA, 2025).

O fornecimento nutricional necessário à planta em pomares citrícolas e o estabelecimento de melhores práticas de manejo, visam aumentar a produção e qualidade do fruto de citros. Sendo essas estratégias baseadas na aplicação de fertilizantes granulares, via sistema de fertirrigação ou através de aplicação foliar, promovendo produção global sustentável de citros (Mattos Jr. *et al.*, 2020). Nesse contexto, o magnésio (Mg) desempenha um importante papel na determinação da qualidade da fruta, principalmente para aquela destinada à indústria, devido a respostas associadas ao transporte de carboidratos na planta. Destaca-se que a concentração de Mg na planta está diretamente relacionada com o acúmulo de açúcares no fruto (Quaggio *et al.*, 1992). O Mg, integra o átomo central da molécula da clorofila e é responsável por alocar entre 15-20% do seu conteúdo total na clorofila da planta (Kumar *et al.*, 2016). Além disso, destaca-se pela ativação de mais de 300 enzimas, incluindo metabólitos importantes e enzimas chaves (Li *et al.*, 2017).

A fonte de fertilizante mais utilizada para aplicação foliar de Mg na citricultura tem sido o sulfato, apresentando solubilidade em água e agregação na produção de mais ramos novos na planta (Kumar *et al.*, 2016), entretanto, essa fonte demonstra algumas intempéries no campo da tecnologia de aplicação, como a limitação de aplicação afim de evitar fitotoxicidade nas folhas, associada com altos índices salinos e a possível interação com outros produtos no tanque de pulverização (Fernández *et al.*, 2013). Existem outras fontes de magnésio aplicáveis

via foliar em citros, destacando-se o nitrato de magnésio $Mg(NO_3)_2$ e o fosfito de magnésio ($MgSO_3$) com a indução da enzima peroxidase (Fischer *et al.*, 2023).

A redução da capacidade fotossintética promove redução na utilização bioquímica de energia luminosa absorvida, induzindo a formação de espécies reativas de oxigênio (ERO's), como radicais superóxido e peróxido de hidrogênio (H_2O_2) (Trakner *et al.*, 2019). Como as ERO's são altamente tóxicas e podem danificar letalmente componentes celulares, espera-se que a atividade de enzimas antioxidantes, como a superóxido dismutase (SOD) e catalase (CAT), seja regulada afim de evitar aumento na produção das ERO's (Ze *et al.*, 2009).

O experimento visa avaliar a interação entre a absorção e a partição de Mg em condições de baixa, adequada e excessiva disponibilidade do nutriente. Assim buscou-se compreender a atuação das enzimas antioxidantes sob diferentes fontes de Mg (sulfato, nitrato e fosfito) e concentrações. Dessa forma, comprovar se a aplicação de doses mais elevadas é necessária para ativar o sistema antioxidante e atividade fotossintética das plantas de citros.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Alterações fisiológicas induzidas pela atuação do Mg em plantas cítricas

No contexto do manejo adequado da adubação, relacionado às estratégias usadas para aumentar a produção no pomar, destaca-se o Mg como importante componente das células da planta e sua atuação nos diversos processos fisiológicos de crescimento e reprodução de citros (Gransee *et al.*, 2013). Os sintomas de deficiência de Mg, são considerados um distúrbio nutricional comum e um problema generalizado que afeta a produtividade e a qualidade das frutas. E a existência de uma única forma de absorção do Mg, cria uma ligação fraca entre Mg e colóides do solo, assim como nas bordas das células radiculares, favorecendo a deficiência de Mg intercambiável do solo (Chaudhry *et al.*, 2021). O Mg atua na ativação ou atividade da Rubisco de maneira direta ou indireta na estruturação dos cloroplastos e síntese da clorofila, sendo que a estrutura do cloroplasto requer Mg (Trakner *et al.*, 2019). O cátion divalente de magnésio forma cargas superficiais negativas nas membranas tilacóides e assim, permite o empilhamento das membranas (Puthiyaveetil *et al.*, 2017).

Os sintomas comuns de deficiência de Mg são: o retardamento do crescimento e a clorose nas folhas mais velhas. Essencialmente, a clorose é progressiva, ou seja, começa nas folhas mais velhas e progride para as folhas mais novas (Cakmak *et al.*, 2008). Devido a característica de mobilidade do elemento, as plantas remobilizam o Mg de forma progressiva; sendo essa a razão pela qual os primeiros sintomas de deficiência visual geralmente aparecem nas folhas mais velhas e depois nas folhas recém-expandidas.

A degradação da clorofila nas plantas, é provocada por dois processos cruciais, pela acumulação de ERO's e pela peroxidação lipídica nas membranas do cloroplasto. O excesso das ERO's pode oxidar macromoléculas biológicas, enfraquecer a membrana e induzir o processo de peroxidação lipídica, resultando em dano oxidativo às membranas celulares (Song *et al.*, 2020).

O equilíbrio entre as EROs e o sistema antioxidante da planta, dentro de diferentes compartimentos de células fotossinteticamente ativas, é um sistema altamente dinâmico (espacial e temporal) (Trakner *et al.*, 2019). A proteção das células contra o dano fotooxidativo causado pelas ERO's é assegurada por seu complexo sistema antioxidante, e o aumento da atividade do sistema antioxidativo é

esperado sob deficiência de Mg aumentando a atividade das enzimas desintoxicantes de ERO's (Trakner *et al.*, 2019).

Os estudos acerca das restrições relacionadas ao crescimento e desenvolvimento das plantas, identificaram a existência de uma variação entre as espécies de plantas devido à intensidade da deficiência de Mg. Inicialmente, os efeitos da deficiência de Mg compreendem a impedância no acúmulo de açúcar, levando à formação de amido e o acionamento do sistema antioxidante de defesa antes de qualquer efeito perceptível na atividade da fotossíntese (Liu *et al.*, 2022; Ceylan *et al.*, 2016). O Mg ocupa um papel central na fotossíntese, sendo responsável pela estabilização das moléculas de clorofila e otimizando a utilização de energia luminosa, conforme relatado em Liu *et al.* (2025).

Em pomares com sintomas presentes de deficiência de Mg, uma das estratégias utilizadas para aumentar a eficiência no uso de Mg pelas plantas é a biofortificação agrônômica. Trata-se da sustentação do crescimento das plantas e da manutenção de altas concentrações de Mg, pela aplicação de fertilizantes a base de Mg, geralmente fornecidos como sulfato, carbonato ou ripas de óxido (Chaudhry *et al.*, 2021). O sulfato de magnésio (MgSO_4) fornece Mg^{2+} prontamente disponível, enquanto o óxido de magnésio (MgO) se comporta como um fertilizante de liberação lenta (White *et al.*, 2008). A aplicação de MgSO_4 é comumente feita em algumas culturas e os sintomas de deficiência de Mg podem ser aliviados pela aplicação foliar de MgSO_4 . O nitrato de magnésio, é aplicado via foliar e resulta em uma melhora dos parâmetros biométricos das plantas (Tadayon, 2020), e o fosfito de magnésio também apresenta aplicação foliar e utilizado em tratamento que visam analisar os efeitos da fonte nos parâmetros fisiológicos das culturas (Coskun, 2023).

2.1.1. Crescimento da planta e alocação de biomassa

Os sintomas de deficiência de Mg são responsáveis por afetar o crescimento e desenvolvimento geral das plantas. A arquitetura reduzida da planta e as manchas necróticas são os sintomas gerais de deficiência de Mg em plantas, e resultam no declínio do conteúdo de clorofila e no particionamento de carbono, assim como o comprometimento no metabolismo do CO_2 (Hermans *et al.*, 2004). O fornecimento adequado de Mg é de extrema importância para a realização de funções essenciais: formação de raízes, clorofila e fotossíntese (Cakmak & Yazici,

2010). Essa baixa disponibilidade do nutriente afeta os índices de crescimento da raiz, os órgãos paternos das raízes primárias e secundárias, e formação de pelos radiculares (Chen *et al.*, 2024). Nesse contexto, o baixo fornecimento de Mg na germinação ou em estágios iniciais de desenvolvimento das plantas, culmina com a redução na produção de matéria seca e detecção primeiro nas raízes e depois nos brotos (Chaudhry *et al.*, 2021).

2.1.2 Atividade fotossintética

Os tratamentos com aplicação de Mg, resultam no aumento da taxa fotossintética e eficiência fotoquímica. Essa elevação das atividades fotossintéticas contribuem para: a eficiência quântica máxima de PSII (F_v' / F_m'), o rendimento do quantum regulatório de dissipação de energia não fotoquímica (NPQt), taxa fotossintética de transferência de elétrons e o rendimento quântico de dissipação de energia não fotoquímica não regulamentado (Liu *et al.*, 2025).

2.1.4 Particionamento de fotossíntese da fonte ao dreno

Sob deficiência de Mg, o acúmulo de sacarose e amido (amilose e amilopectina) nas folhas novas e velhas são características presentes em plantas cítricas. Além disso, o acúmulo de carboidratos não estruturais ocorre muito antes do aparecimento dos sintomas de depleção de Mg e da inibição de fotossíntese. A inibição do fornecimento de sacarose em folhas deficientes em Mg é causada principalmente pela inibição da sua fonte de exportação (He *et al.*, 2020). A acumulação da sacarose nas folhas originais deve-se provavelmente a um comprometimento do carregamento do floema, pelo cotransportador H⁺/sacarose, que requer Mg-ATPase para gerar força motriz do próton (H⁺) (Chaudhry *et al.*, 2021; Ayre, 2011). Sob condições deficientes de longo prazo, as folhas inferiores também acumulam altas concentrações de amido, o que resulta no crescimento restrito do sistema radicular. Dessa forma, o acúmulo de carbono nas folhas originais é a principal alteração induzida pela deficiência de Mg nas plantas (Chaudhry *et al.*, 2021).

2.1.5 Alteração ultraestrutural e dano oxidativo

O aparecimento de sintomas de clorose e necrose em plantas é devido ao dano na ultraestrutura do cloroplasto. A degradação da clorofila e os sintomas de amarelecimento das folhas, sugerem que o cloroplasto pode estar envolvido na regulação dos sintomas na planta (Song *et al.*, 2020). A ativação do sistema antioxidante da planta, em função da deficiência de Mg, possivelmente ocorrerá nos cloroplastos, em detrimento da fotoprodução de O_2 e H_2O_2 , sendo resultado do restrito consumo de potencial redutor na fixação de CO_2 . E os danos aos elementos celulares, como a membrana de lipídeos, proteínas e ácidos nucleicos, podem ser causados pelas ERO's, resultando em perturbação na atividade do metabolismo antioxidante (Silva, 2023). Enquanto isso, o sistema de defesa antioxidante é ativado para eliminar as ERO's, que protegem as células dos danos oxidativos. O acúmulo de malondialdeído foi relatado sob condições de esgotamento de Mg. Nessas mesmas circunstâncias, as atividades de enzimas, como CAT e POD, também podem aumentar (Song *et al.*, 2020).

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo geral

Analisar se o fornecimento de Mg via diferentes fontes afeta as respostas fisiológicas dos citros ao estresse ambiental e a interação entre a absorção e a partição de Mg em condições de baixa, adequada e excessiva disponibilidade do nutriente.

3.2 Objetivos específicos

Avaliar as respostas no sistema fotossintético, antioxidante e no estado nutricional de laranjeira Pêra sob diferentes fontes de Mg em condições de baixa, adequada e alta disponibilidade do nutriente.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material vegetal e instalação do experimento

O experimento foi realizado em viveiro telado do Centro de Citricultura Sylvio Moreira, situado em Cordeirópolis, SP (22°27'43.4"S e 47°23'55.9"W), com temperaturas médias entre 18 e 30° C, sendo o início da sua implantação no mês de outubro de 2023, utilizando-se mudas de laranjeira Pêra [*Citrus × sinensis* (L.) Osbeck] enxertadas em tangerineira Sunki (*Citrus × sunki* Hort. ex Tanaka). As plantas foram cultivadas em vasos de plástico de 12 L, contendo substrato vegetal (empobrecido em Mg), comumente utilizado na produção de mudas cítricas (Figura 1), com sistema de irrigação, utilizando gotejadores de quatro saídas. No manejo da estufa, houve a utilização de armadilhas de feromônio contra os psílídeos, retirada de folhas mortas ou doentes e limpeza dos resíduos secos.



Figura 1: Disposição das plantas de laranjeira Pêra enxertadas em tangerineira Sunki plantadas em vasos de 12 L com substrato empobrecido em magnésio (Cordeirópolis, SP, 2023).

Os experimentos foram instalados em dois delineamentos experimentais diferentes. Foi realizada a aplicação foliar nos tratamentos utilizando a concentração de 500 mg L⁻¹ no primeiro experimento, representando a dose de 10 kg de MgSO₄ (9% Mg) em 2000 L de calda de pulverização, prática usualmente utilizada na citricultura. O delineamento foi inteiramente casualizado (DIC), composto por 4 tratamentos (controle, nitrato, sulfato e fosfito de magnésio) com cinco repetições

cada, totalizando os 20 vasos (Tabela 1).

Tabela 1. Fontes e doses de magnésio (Mg) aplicadas via foliar em plantas de laranjeira 'Pêra'.

Tratamento	Fonte	Doses de Mg (mg L⁻¹)
CONTROLE	---	---
S500	Sulfato de Mg	500
N500	Nitrato de Mg	500
P500	Fosfito de Mg	500

O segundo experimento foi um fatorial duplo inteiramente casualizado (3x3), em que os fatores foram as fontes de Mg [(controle, sulfato (MgSO₄) e nitrato (Mg (NO₃)₂)] e as doses de baixa (125 mg L⁻¹), adequada (500 mg L⁻¹) e alta (2000 mg L⁻¹) disponibilidade do nutriente, respectivamente, (, e) com cinco repetições cada tratamento, totalizando 45 vasos (Tabela 2).

Tabela 2. Fontes e doses de magnésio (Mg) aplicadas via foliar em plantas de laranjeira 'Pêra'.

Tratamento	Fonte	Dose de Mg [mg L⁻¹]
Controle	---	---
S125	Sulfato de Mg	125
S500	Sulfato de Mg	500
S2000	Sulfato de Mg	2000
N125	Nitrato de Mg	125
N500	Nitrato de Mg	500
N2000	Nitrato de Mg	2000

A quantidade de solução a ser aplicada nas plantas (Figura 2) foi obtida por meio das pesagens dos vasos com as laranjeiras antes e após a pulverização foliar (precisão da balança +/- 0,1 g). Na realização da pulverização foliar colocou-se um aparato de plástico sobre o vaso, evitando que houvesse contaminação do substrato com a solução pulverizada. Após a adubação foliar os vasos foram distribuídos inteiramente ao acaso.



Figura 2. Cobertura das plantas de laranja Pêra após a aplicação foliar de diferentes fontes e doses de magnésio (Mg).

Foram realizadas três aplicações dos tratamentos, sendo feitas em três estágios distintos de desenvolvimento da muda de laranja: na conformação de ‘palito’, assim que emitiu o primeiro fluxo de vegetação (\pm 3 ramos novos). A 2^a e 3^a aplicações foram realizadas trimestralmente, respectivamente, quando o segundo, terceiro e quarto fluxo vegetativo estavam em pleno desenvolvimento.

Após cerca de 30 dias posterior à 3^a aplicação, as plantas passaram por uma coleta destrutiva e foram divididas em folha e ramo da “parte velha” e “parte nova” e raízes.

4.2. Parâmetros bioquímicos e fisiológicos das plantas

Foram realizadas medições de rendimento fotossintético com a utilização do dispositivo Multispeq (PhotosynQ, Multispeq V 2.0, USA, ligado à plataforma PhotosynQ (<http://www.photosynq.org>) (KUHLGERT *et al.*, 2016). Foram feitas medidas e/ou cálculos de fluxo total de elétrons dos complexos de antenas em PSII (fluxo linear de elétrons, LEF), fração de centros abertos PSII (ql), o rendimento do PSII (Φ_2 , ϕ_{II}), a eficiência quântica máxima de PSII (F_v' / F_m'), total de *quenching* não fotoquímico (NPQt), fração de luz dedicada ao *quenching* não fotoquímico (Φ_{NPQ}) e fração de luz perdida via processos inibidores de fotossíntese não regulados (Φ_{NO}). A avaliação do índice SPAD (medição indireta da concentração de clorofilas nas folhas novas com uso do SPAD-502, Minolta Co-Ltd, Osaka, Japão), conforme Souza *et al.* (2011).

O preparo do extrato enzimático, seguiu a metodologia proposta por Kar e Mishra (1976) macerando as folhas coletadas em almofariz gelado com aplicação de nitrogênio líquido, e posterior centrifugação a 10000 x g seguida de coleta do sobrenadante. A partir desse extrato foram determinadas a atividade das enzimas superóxido dismutase (SOD, EC 1.15.1.1) (Peixoto *et al*, 1999), catalase (CAT, EC 1.11.1.6) (Peixoto *et al*, 1999) e peroxidase total (PODs, EC 1.11.1.7) (Teisseire e Guy, 2000) em espectrofotômetro nos comprimentos de onda 560, 240 e 430 nm respectivamente. A produção de malonaldeído (MDA) foi calculada utilizando-se o coeficiente de extinção molar do conteúdo produzido pela peroxidação de lipídios (Rama Vevi e Prasad, 1998). Posteriormente a obtenção de folhas para a preparação do extrato enzimático, realizou-se a separação da parte aérea e radicular e dividiu-se as duas respectivas partes das plantas em “parte nova” e “parte velha”. Após secagem das folhas em estufa, as amostras foram pesadas em balança analítica de precisão.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA), e interpretados com auxílio do software estatístico *R*, e, em caso de significativos ($p < 0,05$), as médias dos tratamentos foram comparadas por meio do teste de Tukey $\alpha=5\%$.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Análises fluorimétricas dos tratamentos em delineamento fatorial

Não houve interação significativa entre os fatores 'Fonte' e 'Dose' na análise fluorimétrica da primeira coleta, entretanto, houve significância entre os fatores analisados isoladamente (Figura 3). No NPQt, a dose 2000 mg L⁻¹ foi superior às doses 500 mg L⁻¹ e 125 mg L⁻¹ ($2,90 \pm 0,22$ vs. $1,03 \pm 0,10$ e $1,00 \pm 0,08$, respectivamente).

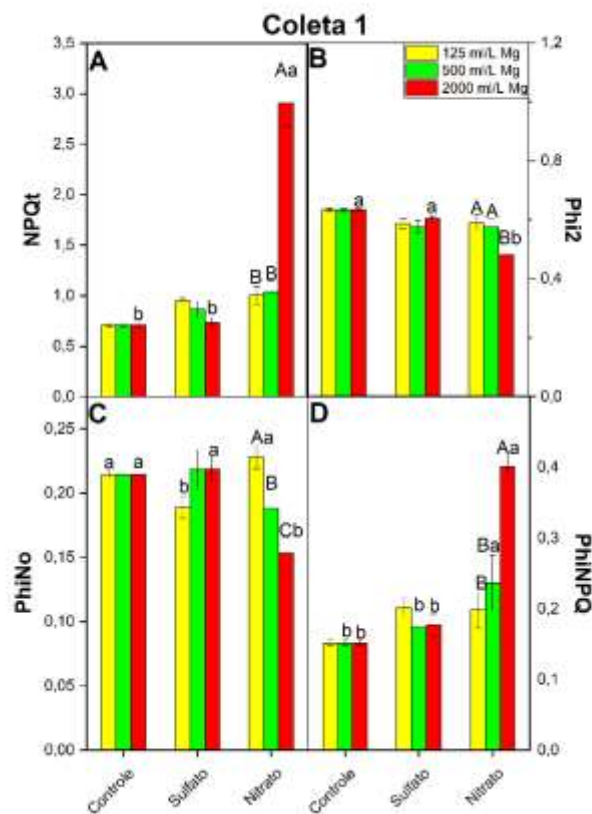


Figura 3: Rendimento fotossintético de plantas de laranja Pêra sob diferentes fontes e doses de Mg. Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. A: fração de luz dedicada ao quenching não fotoquímico; B: rendimento do PSII; C: fração de luz perdida via processos inibidores de fotossíntese não regulados e D: fração de luz dedicada ao quenching não fotoquímico.

A dissipação na forma de calor (NPQt), reduz a formação de espécies reativas de oxigênio (EROs) e protege os centros de reação, dessa forma, atuando como um mecanismo essencial de fotoproteção (Liu *et al.*, 2025). No presente

estudo, a elevação de NPQt em condições de doses elevadas 2000 mL L⁻¹, associada com a diminuição de Φ NO, indica incremento da fotoproteção por dissipação térmica e, conseqüentemente, maior proteção contra o dano estrutural às membranas dos tilacoides (Ye *et al.*, 2019). Segundo Kitajima & Butler (1975), o parâmetro Φ PSII reflete a eficiência máxima do PSII, e sua redução indica fotoinibição ou dano fotoquímico, enquanto o NPQt expressa a dissipação de energia excedente via ciclo das xantofilas, crucial para a estabilidade do PSII. Assim, o baixo índice NPQt e o aumento de Φ NO sob estresse nutricional de Mg refletem ineficiência na dissipação térmica e acúmulo de energia excitônica, o que leva à oxidação de pigmentos e proteínas do PSII.

Na segunda coleta, a interação entre os fatores não foi observada, apesar de que ao analisar os fatores isoladamente, percebeu-se que a fonte “controle” revelou uma resposta abaixo das demais fontes (Figura 4). No Φ No, na dose de 500 mg L⁻¹, as fontes controle, sulfato e nitrato apresentaram valores de Φ NO (0,25 ± 0,019 vs. 0,20 ± 0,019 e 0,19 ± 0,009, respectivamente).

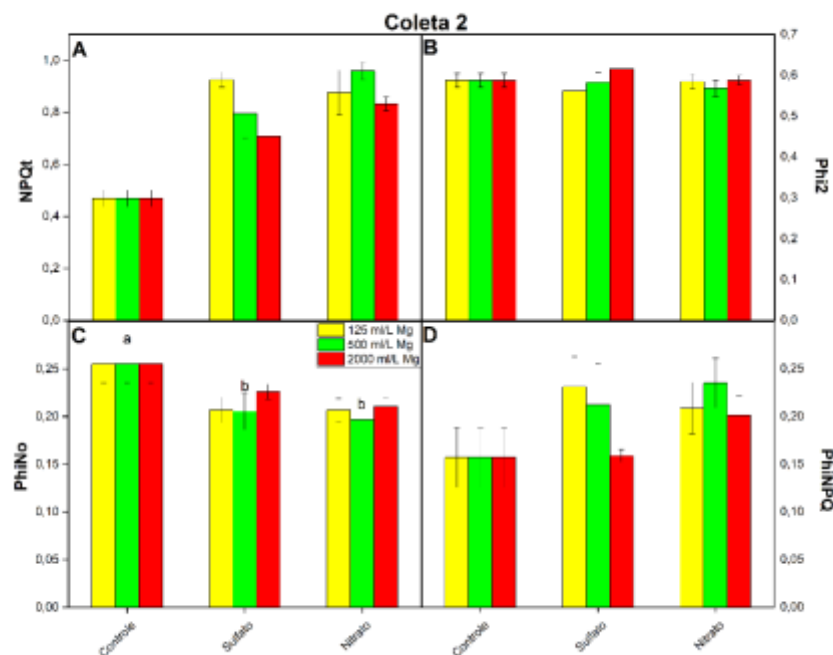


Figura 4: Rendimento fotossintético de plantas de laranja Pêra sob diferentes fontes e doses de Mg. Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. A: fração de luz dedicada ao quenching não fotoquímico; B: rendimento do PSII; C: fração de luz perdida via processos inibidores de fotossíntese não regulados e D: fração de luz dedicada ao quenching não fotoquímico.

Dentro da mesma dose, o nitrato teve uma PhiNo menor. As respostas referentes a fonte nítrica, indicam que no estabelecimento inicial do pomar as concentrações elevadas do nutriente podem auxiliar a absorção de Mg^{2+} pela planta, assim como elevar a eficiência fotoquímica e o transporte fotossintético de elétrons e conseqüentemente reduzir a dissipação de energia não regulatória, mitigando fotoxidação ao PSII (Liu *et al.*, 2025).

Na terceira coleta, apenas a fonte sulfato diferiu entre as doses (Figura 5). De modo à dose 125 $mg L^{-1}$ apresentar o maior rendimento de NPQt em relação às doses de 500 $mg L^{-1}$ e 2000 $mg L^{-1}$ ($0,52 \pm 0,02$ vs. $0,42 \pm 0,02$ e $0,45 \pm 0,02$, respectivamente).

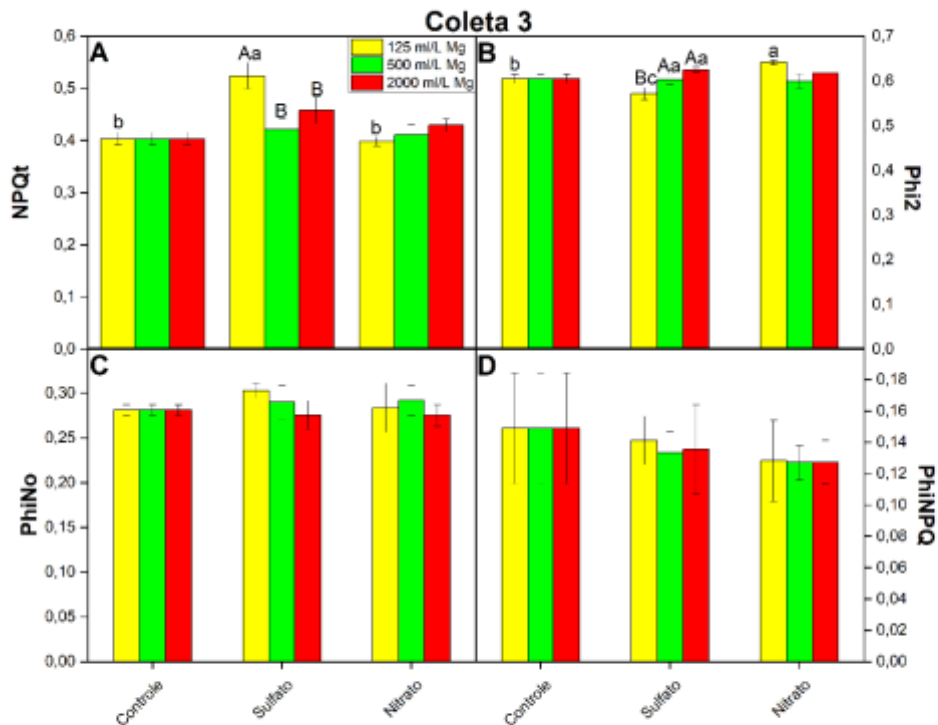


Figura 5: Rendimento fotossintético de plantas de laranja Pêra sob diferentes fontes e doses de Mg. Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. A: fração de luz dedicada ao quenching não fotoquímico; B: rendimento do PSII; C: fração de luz perdida via processos inibidores de fotossíntese não regulados e D: fração de luz dedicada ao quenching não fotoquímico.

Segundo Liu *et al.*, (2025), a menor resposta observada na fonte de sulfato de Mg pode ser explicada pela necessidade da aplicação de concentrações mais elevadas em plantas cítricas.

5.1.1. Índice SPAD

O índice SPAD, relativo a medição indireta de clorofila total na planta, revelou diferenças entre os tratamentos nas coletas 1 e 2. Esse resultado pode ser explicado pelo aumento na quantidade de clorofilas, uma vez que o Mg é considerado o elemento central da molécula de clorofila (Altarugio *et al.*, 2017).

Na primeira coleta, a fonte nitrato apresentou o maior valor de índice SPAD com a dose de 2000 mg L⁻¹ (Figura 6). E apresentou diferença em relação ao sulfato na dose de 2000 mg L⁻¹ (74,12 ± 1,98 e 67,57 ± 1,51, respectivamente).

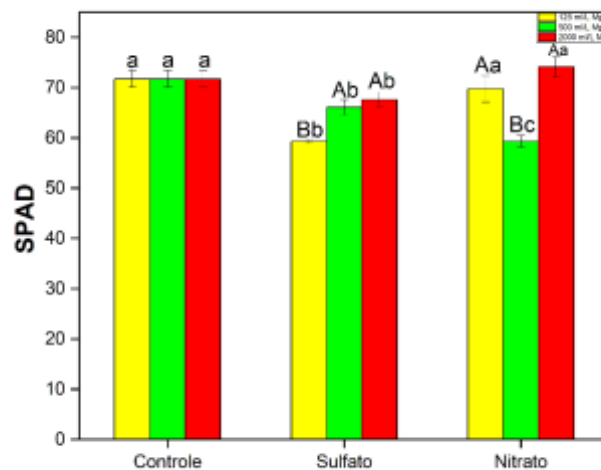


Figura 6: Teor indireto de clorofila em plantas de laranja Pera sob diferentes fontes e doses de Mg (primeira coleta). Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte.

A segunda coleta, mostrou uma elevação do índice SPAD na fonte de sulfato 500 mg L⁻¹ (77,40 ± 4,06), sendo que ela diferiu entre fontes e doses (Figura 7). Enquanto o controle e o nitrato apresentaram os seguintes valores de SPAD na dose de 500 mg L⁻¹ (60,42 ± 1,73 e 53,88 ± 2,13, respectivamente). E os valores diferiram-se em relação às demais doses, da fonte sulfato, de 125 mg L⁻¹ e 2000 mg L⁻¹ (69,12 ± 0,70 e 61,10 ± 1,61, respectivamente) redução em comparação aos

outros tratamentos que, mantiveram ou elevaram suas médias em comparação à primeira coleta.

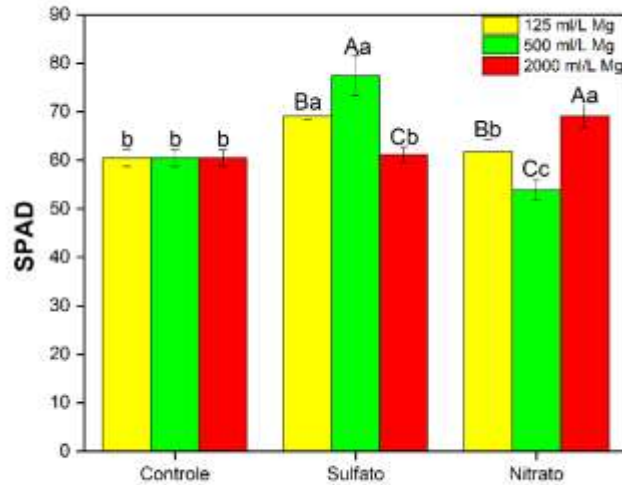


Figura 7: Teor indireto de clorofila em plantas de laranja Pera sob diferentes fontes e doses de Mg (segunda coleta) Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte.

Na terceira coleta, não foi relatada diferença estatística entre os tratamentos (Figura 8).

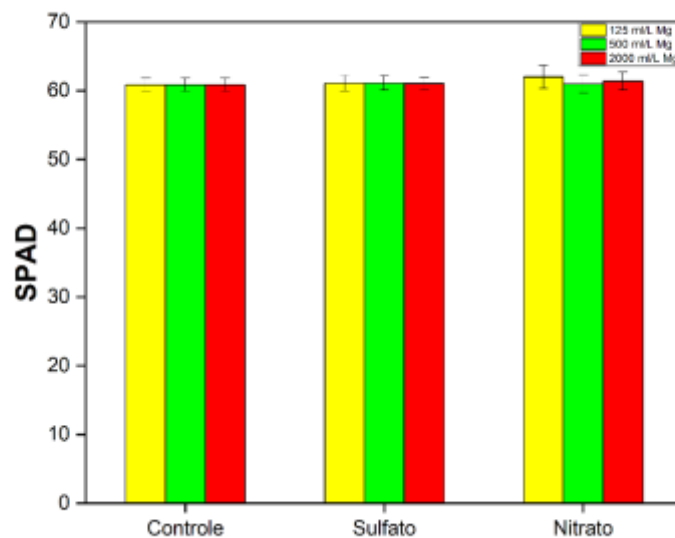


Figura 8: Teor indireto de clorofila em plantas de laranja Pera sob diferentes fontes e doses de Mg (terceira coleta) Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte.

5.1.2. Análises de enzimas antioxidantes e ERO's

O sulfato na dose de 500 mg L⁻¹, demonstrou ser a mais efetiva (Figura 9). Houve diferença sobre as doses de 125 mg L⁻¹ e 2000 mg L⁻¹ (574,50 ± 121,94 vs. 263,61 ± 80,07 e 170,64 ± 12,20, respectivamente).

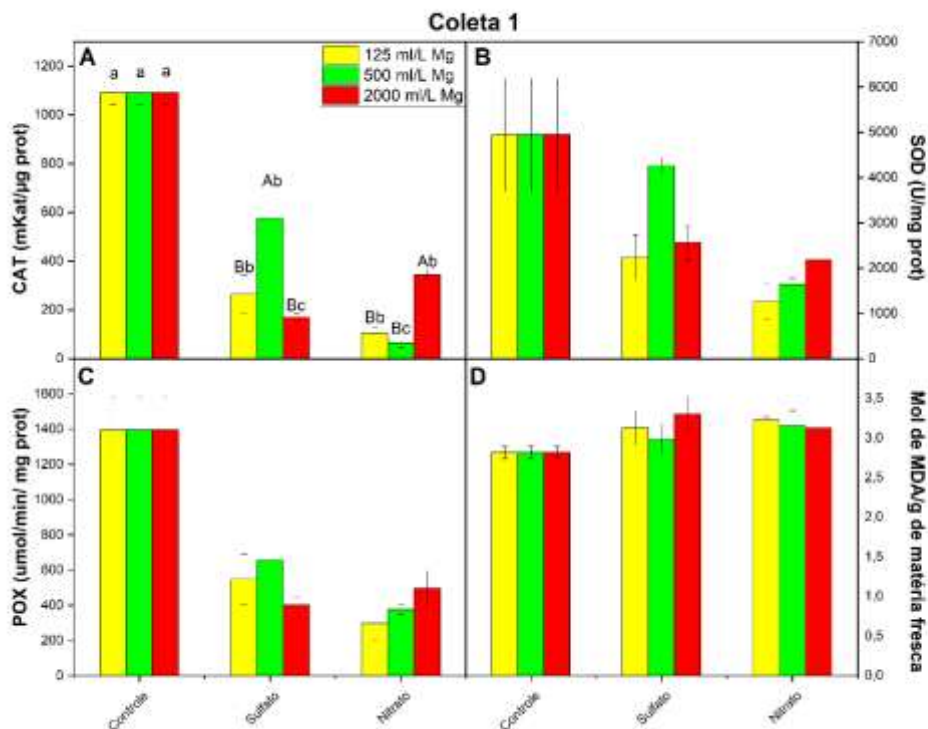


Figura 9: Quantificação da atividade enzimática e peroxidação lipídica em plantas de laranja Pera sob diferentes fontes e doses de Mg (primeira coleta). Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. A: Catalase; B: Superóxido dismutase; C: Peroxidase e D: Peroxidação lipídica.

As enzimas antioxidantes analisadas compõem o sistema de defesa da planta contra as ERO's, e foram quantificadas as atividades das enzimas CAT, SOD e POX e também a peroxidação lipídica através do MDA (Wang *et al.*, 2025).

A elevada atividade das enzimas CAT, SOD e POX no tratamento controle da primeira coleta, pode estar relacionada com a rota de sinalização da planta ao reconhecer a ausência de Mg (Ye *et al.*, 2019). A dose de 500 mg L⁻¹ referente a fonte sulfato, indica uma eficiência da redução na desintoxicação do sistema antioxidante e níveis aumentados de espécies reativas de oxigênio (Wang *et*

al., 2025). Não houve diferença entre os tratamentos no marcador indireto de estresse oxidativo.

Na segunda coleta, observou-se uma resposta progressiva dentre as doses (Figura 10). O baixo aporte (125 mg L⁻¹) de Mg, quando comparado às doses de 500 e 2000 mg L⁻¹ culminou com uma resposta inferior das enzimas. O sulfato na dose de 2000 mg L⁻¹, demonstrou ser a mais efetiva. Diferenciou-se das doses de 125 mg L⁻¹ e 500 mg L⁻¹ (2598,06 ± 327,95 vs. 576,44 ± 62,36 e 963,13 ± 54,66, respectivamente).

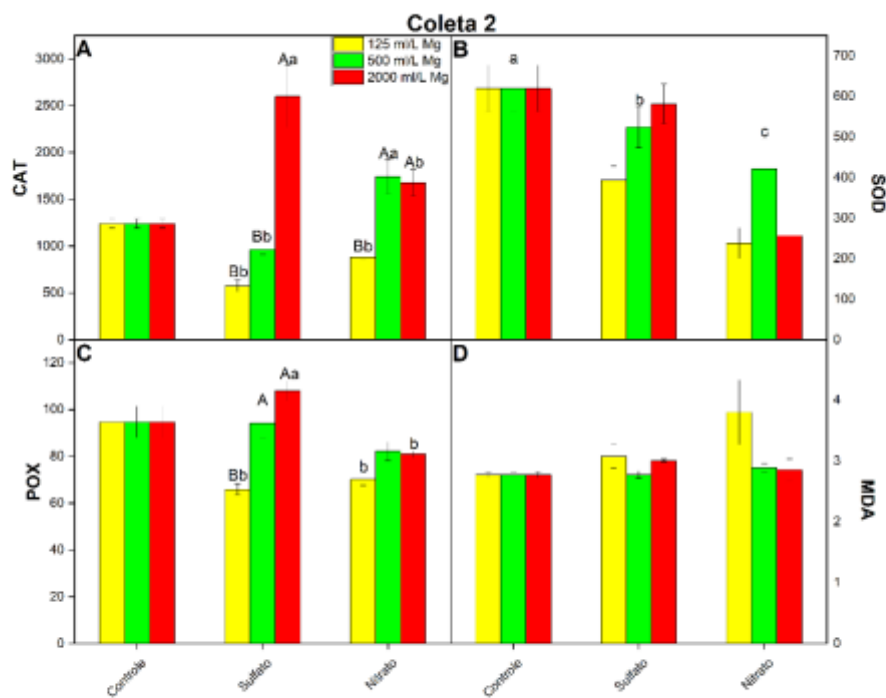


Figura 10: Quantificação da atividade enzimática e peroxidação lipídica em plantas de laranja Pera sob diferentes fontes e doses de Mg (segunda coleta). Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. A: Catalase; B: Superóxido dismutase; C: Peroxidase e D: Peroxidação lipídica.

Esse padrão se repetiu para as fontes a base de sulfato e nitrato, destacando-se a elevada resposta das enzimas CAT e POX na dose 2000 mg L⁻¹ de sulfato. Isso pode estar atrelado a capacidade dessa fonte, em elevadas

concentrações, reprogramar o sistema antioxidante da planta e torná-la mais resistente aos estresses bióticos e abióticos (Mahmoud *et al.*, 2024).

Na terceira coleta, as plantas mais estressadas, independente da dose, foram as relacionadas ao tratamento controle (Figura 11). De maneira geral, a fonte sulfato apresentou baixa resposta na dose de 500 mg L⁻¹. Dessa forma, foi possível interpretar que, independentemente da fonte, doses elevadas aumentam a resposta do sistema antioxidante ao longo do tempo.

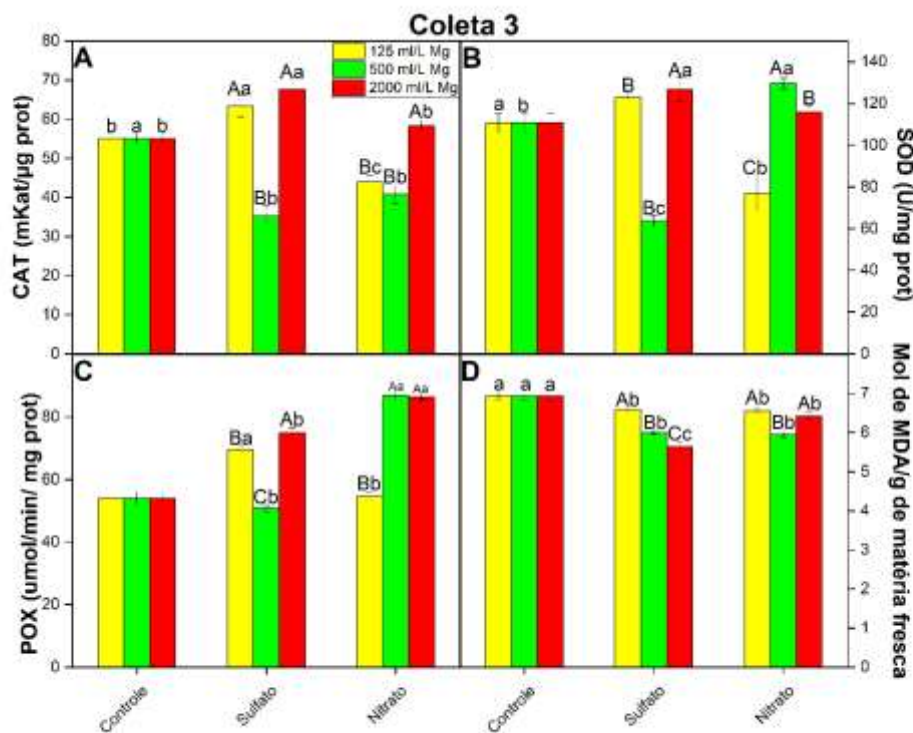


Figura 11: Quantificação da atividade enzimática e peroxidação lipídica em plantas de laranja Pera sob diferentes fontes e doses de Mg (terceira coleta). Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. A: Catalase; B: Superóxido dismutase; C: Peroxidase e D: Peroxidação lipídica.

5.2. Análises fluorimétricas dos tratamentos em delineamento inteiramente casualizado

Os tratamentos analisados em DIC revelaram diferenças entre os tratamentos, sendo que na primeira coleta, a fonte fosfito apresentou valores mais elevados de NPQt em comparação às outras fontes. A dose adequada de fosfito

(500 mg L⁻¹), diferenciou-se das fontes controle, nitrato e sulfato ($1,82 \pm 0,15$ vs. $0,70 \pm 0,01$ vs. $1,03 \pm 0,10$ e $0,86 \pm 0,08$, respectivamente).

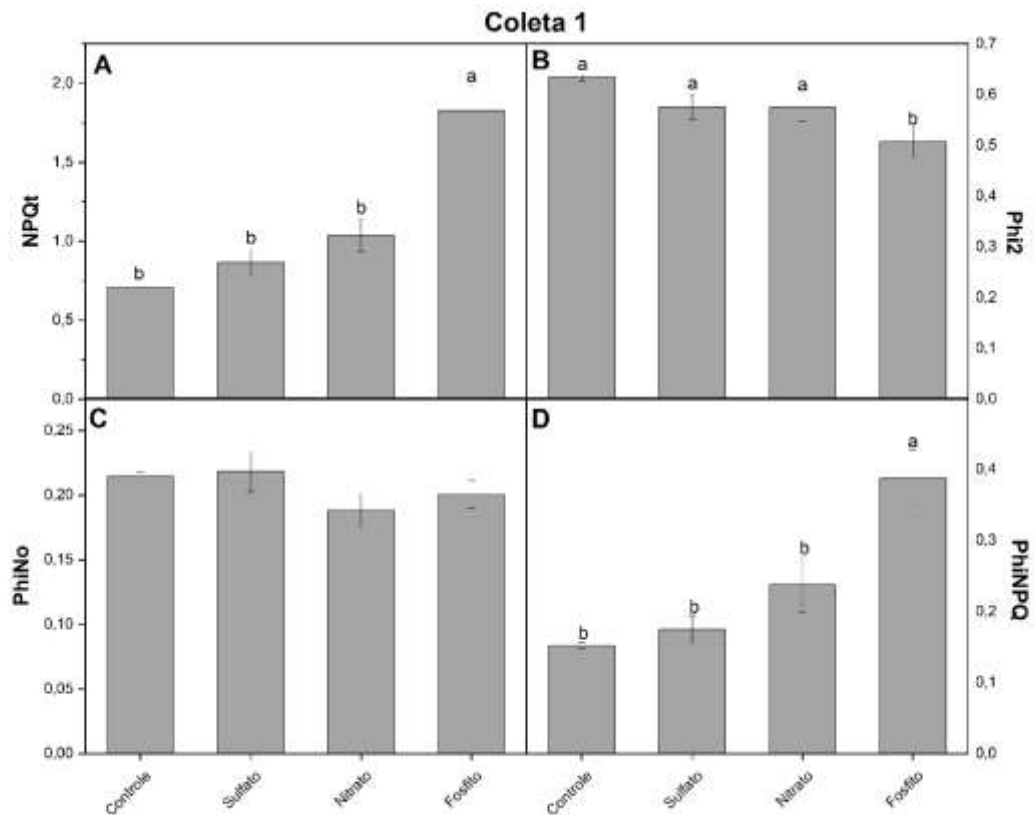


Figura 12: Rendimento fotossintético em plantas de laranja Pera sob diferentes fontes de Mg (primeira coleta). Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. A: fração de luz dedicada ao quenching não fotoquímico; B: rendimento do PSII; C: fração de luz perdida via processos inibidores de fotossíntese não regulados e D: fração de luz dedicada ao quenching não fotoquímico.

Acerca das medições do rendimento fotossintético, o fosfito aparenta carrear o Mg²⁺ de maneira mais imediata que outras fontes, apesar que essa tendência se iguala aos demais tratamentos ao longo do tempo. A razão para essa fonte apresentar esse comportamento, está associado a estimulação do sistema de defesa das plantas, inibindo fosforilação oxidativa e indiretamente ativando o mecanismo de defesa da planta (Mohammadi *et al.*, 2020).

Na segunda coleta, houve um aumento na concentração dos valores de NPQt nas fontes de sulfato e nitrato (Figura 13). E apenas o tratamento controle

apresentou diferença em comparação com os demais tratamentos ($1,82 \pm 0,15$ vs. $0,70 \pm 0,01$ vs. $1,03 \pm 0,10$ e $0,86 \pm 0,08$, respectivamente).

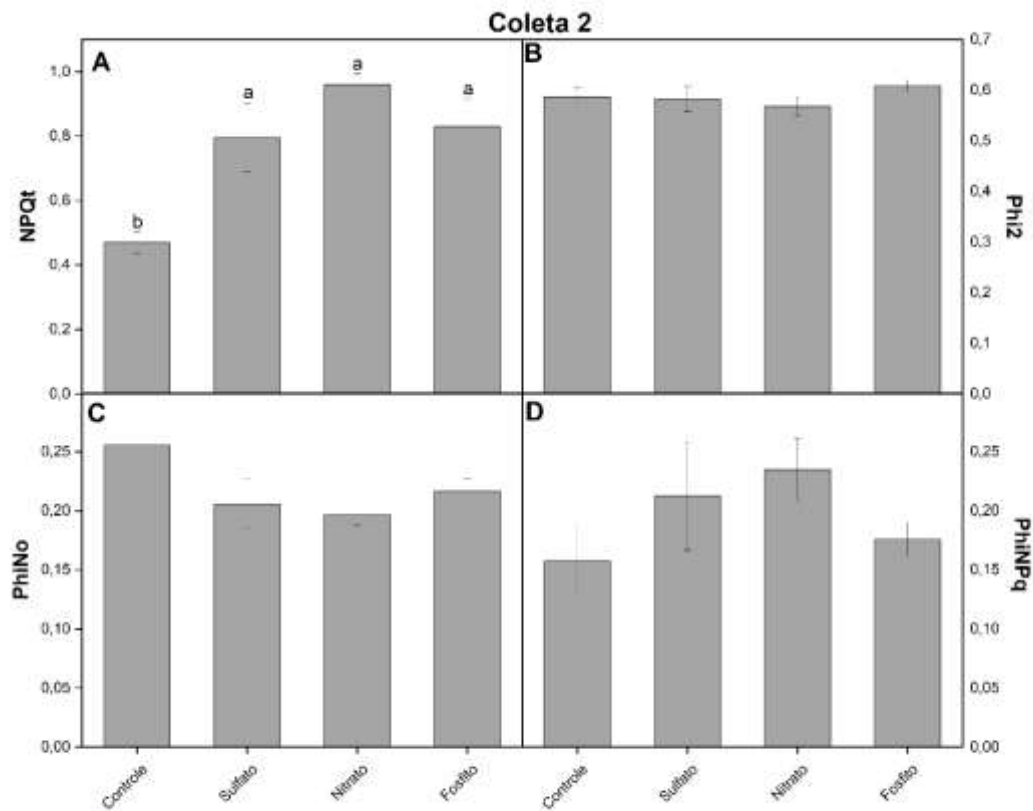


Figura 13: Rendimento fotossintético em plantas de laranja Pera sob diferentes fontes de Mg (segunda coleta) Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. A: fração de luz dedicada ao quenching não fotoquímico; B: rendimento do PSII; C: fração de luz perdida via processos inibidores de fotossíntese não regulados e D: fração de luz dedicada ao quenching não fotoquímico.

A redução perceptível de NPQt no controle, é explicada pela redução do conteúdo e fluorescência da clorofila (Mohammadi *et al.*, 2020).

A terceira coleta, dos tratamentos analisados em DIC, culminou com a ausência de diferença entre os tratamentos (Figura 14).

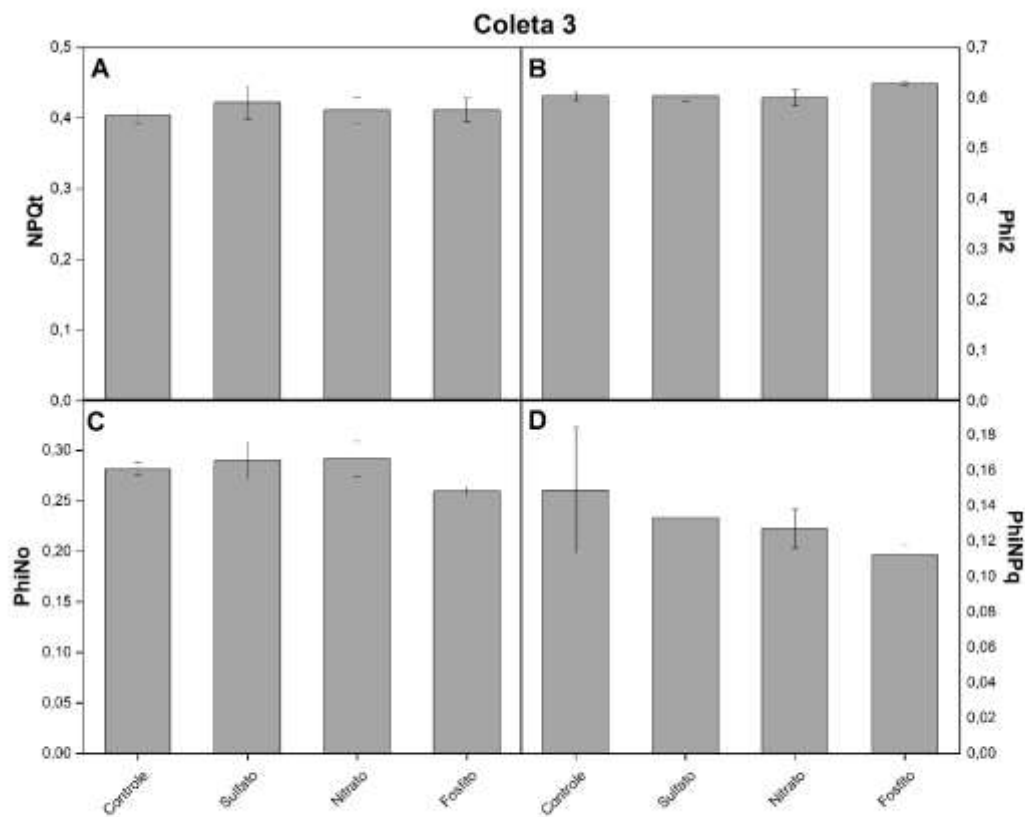


Figura 14: Rendimento fotossintético em plantas de laranja Pera sob diferentes fontes de Mg (terceira coleta). Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. A: fração de luz dedicada ao quenching não fotoquímico; B: rendimento do PSII; C: fração de luz perdida via processos inibidores de fotossíntese não regulados e D: fração de luz dedicada ao quenching não fotoquímico.

5.2.1. Índice SPAD

No DIC, a primeira coleta apresentou elevada presença de clorofilas no tratamento controle e baixa para o nitrato. Na segunda coleta, houve destaque para o crescimento no número de clorofilas relativas à fonte sulfato. Segundo Coskun *et al* (2023), o fosfito de Mg, apresenta uma tendência em não relatar diferença estatística sobre o tratamento controle. A dose adequada de fosfito (500 mg L^{-1}), diferenciou-se das fontes controle e nitrato ($66,15 \pm 1,72$ vs. $71,70 \pm 1,69$ e $59,28 \pm 1,18$, respectivamente).

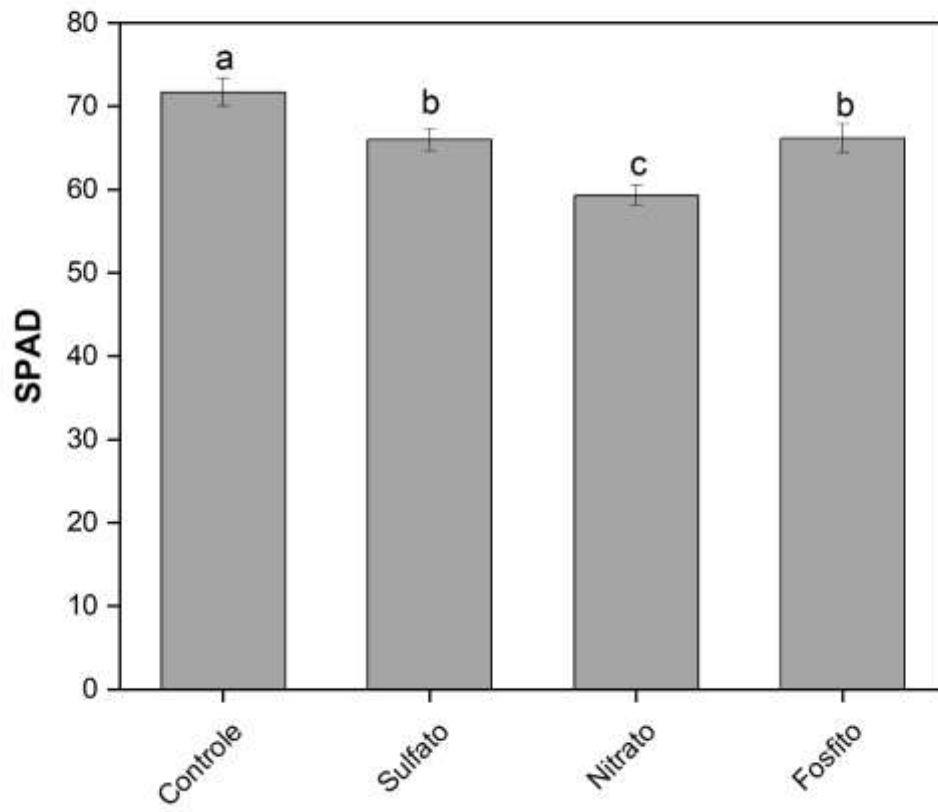


Figura 15: Teor indireto de clorofila em plantas de laranjeira Pera sob diferentes fontes de Mg (primeira coleta) Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte.

Na segunda coleta, a dose adequada de fosfito (500 mg L^{-1}), diferenciou-se apenas da fonte sulfato (63.44 ± 3.19 e 77.40 ± 3.74 , respectivamente).

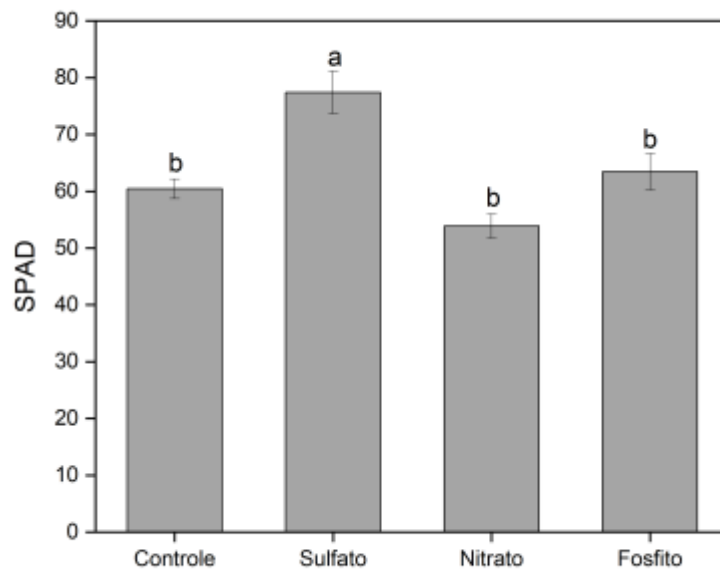


Figura 16: Teor indireto de clorofila em plantas de laranja Pera sob diferentes fontes de Mg (segunda coleta). Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte.

A terceira coleta, dos tratamentos analisados em DIC, culminou com a ausência de diferença entre os tratamentos (Figura 17).

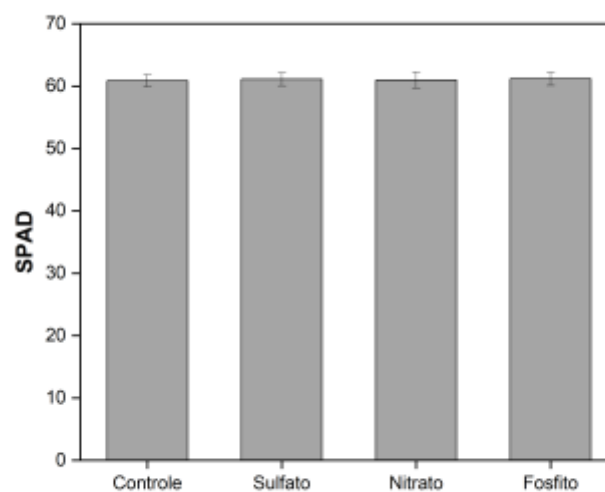


Figura 17: Teor indireto de clorofila em plantas de laranja Pera sob diferentes fontes de Mg (terceira coleta). Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte.

5.2.2. Análises de enzimas antioxidantes e ERO's

No DIC, as elevadas respostas das enzimas foram mantidas no tratamento controle, enquanto não houve diferença entre os tratamentos no conteúdo de MDA (Figura 18). O controle apresentou diferença estatística em comparação com o sulfato, nitrato e fosfito.

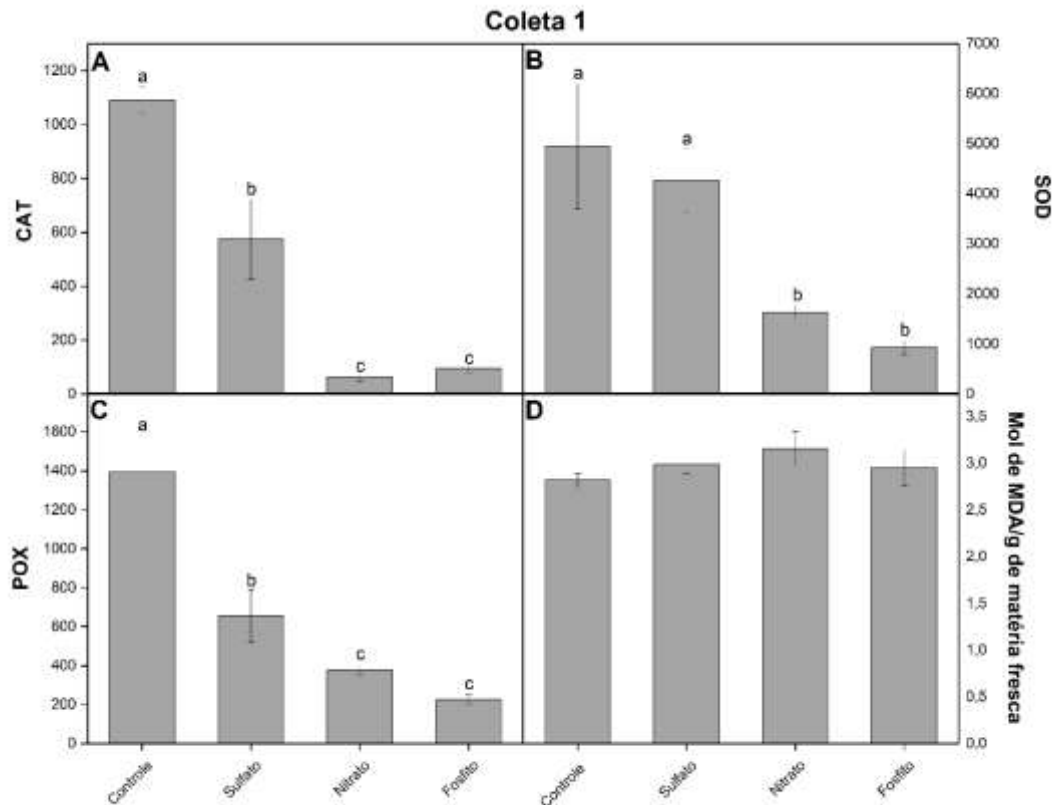


Figura 18: Quantificação da atividade enzimática e peroxidação lipídica de laranja Pera sob diferentes doses de Mg (primeira coleta). Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. A: Catalase; B: Superóxido dismutase; C: Peroxidase e D: Peroxidação lipídica.

Na Figura 19, no DIC, relatou-se a resposta mais baixa no tratamento de fosfito em comparação às outras fontes. O carregamento de Mg pela fonte fosfito relatado no tópico 5.2, resultou em uma menor ativação do sistema de antioxidante das plantas cítricas (Mohammadi *et al.*, 2020).

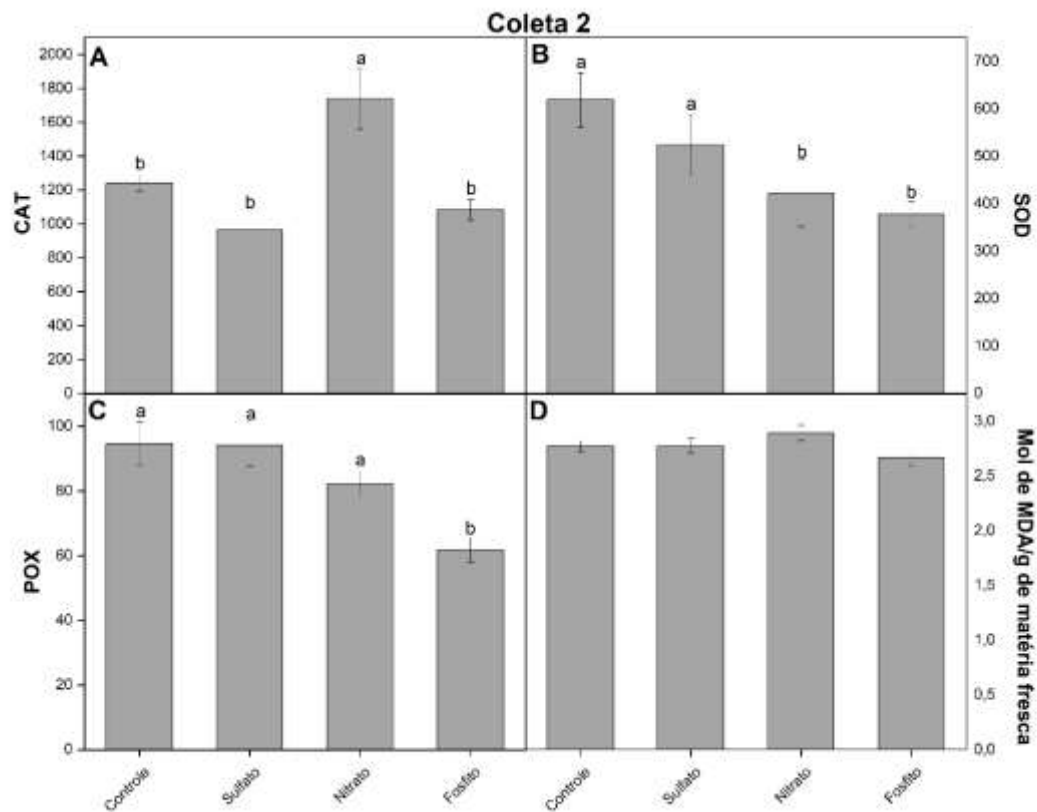


Figura 19: Quantificação da atividade enzimática e peroxidação lipídica de laranja Pera sob diferentes doses de Mg (segunda coleta). Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. A: Catalase; B: Superóxido dismutase; C: Peroxidase e D: Peroxidação lipídica.

Na terceira coleta, para o DIC, observou-se que os tratamentos fosfito e controle, estressaram a planta. Contudo, houve uma baixa atividade da catalase e elevada atividade de SOD.

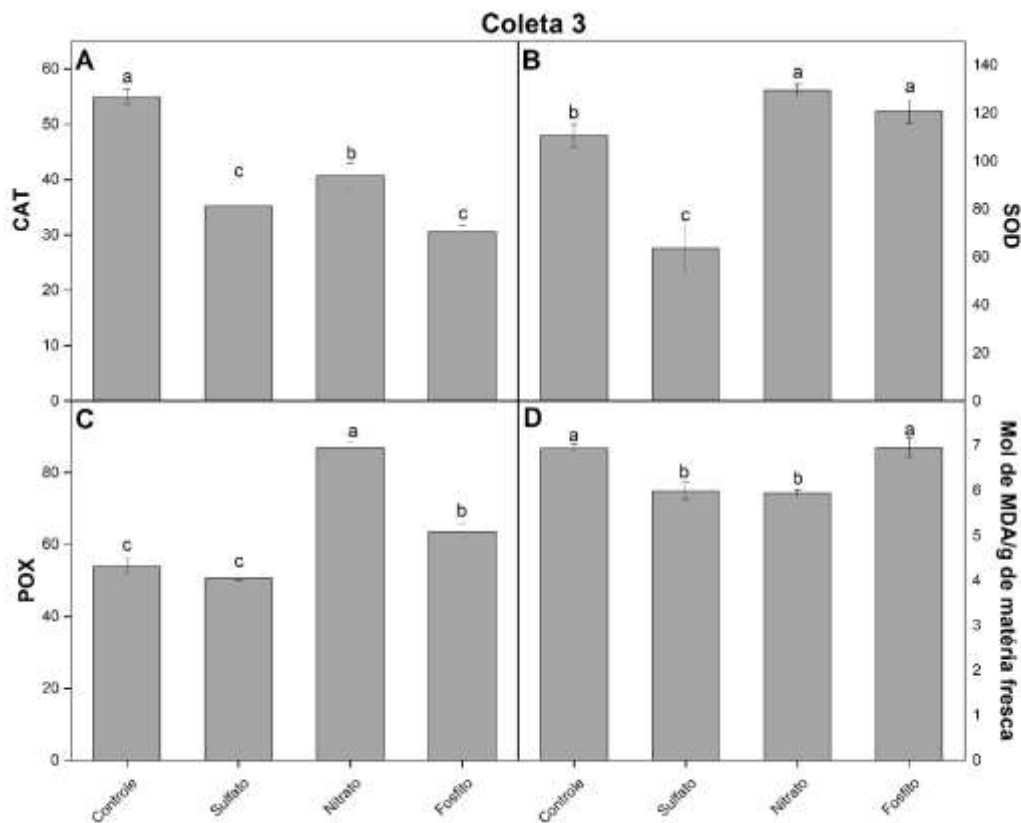


Figura 20: Quantificação da atividade enzimática e peroxidação lipídica de laranja Pera sob diferentes doses de Mg (terceira coleta). Letras minúsculas representam diferença entre fontes na mesma dose, letras maiúsculas representam diferença entre doses dentro da mesma fonte. A: Catalase; B: Superóxido dismutase; C: Peroxidase e D: Peroxidação lipídica.

5.3. Quantidade de massa seca por secção de planta

A quantidade de massa seca pode indicar o quanto uma planta cresceu no período do experimento. Ao dividir essa planta em parte velha e parte nova, seccionando em caule, folha e raiz, é possível saber como cada parte da planta respondeu aos tratamentos.

A Tabela 3 mostra a quantidade de massa seca em DIC. O tratamento Control obteve uma maior massa em relação aos outros tratamentos, esse resultado já foi evidenciado pelo delineamento fatorial.

Tabela 3. Massa seca de caule velho (MSCV), folha velha (MSFV), caule novo (MSCN), folha nova (MSFN), raiz (MSR) e total (MST) em plantas de laranjeira 'Pêra' enxertada em tangerineira Sunki submetidas a aplicação foliar de diferentes fontes de magnésio (Mg).

Tratamentos	MSCV	MSFV	MSCN	MSFN	MSR	MST
	----- gramas (g) -----					
CONTROLE	87,67 a	20,25 a	7,17 b	24,10 a	90,50 a	229,70 a
S500	77,45 b	19,34 a	8,66 a	22,61 b	73,56 c	201,43 c
N500	84,20 a	16,20 b	7,14 b	16,97 d	72,17 c	196,70 c
P500	85,50 a	22,22 a	7,17 b	20,06 c	84,03 b	218,99 b
Teste F	**	**	**	**	**	**

*: significativo a 5% pelo teste F; **: significativo a 1% pelo teste F; ns: não significativo. Letras minúsculas representam a diferença estatística pelo teste de médias 'Scott-Knott' entre os tratamentos na dose 500 mg L⁻¹ de sulfato de Mg (S500), 500 mg L⁻¹ de nitrato de Mg (N500) e 500 mg L⁻¹ de fosfito de Mg (P500).

A porcentagem de Mg demonstrou diferenças no DIC (Tabela 4). A uma porcentagem maior de Mg em sulfato e nitrato em comparação ao fosfito e o Controle. Contudo houve em caule velho e raiz uma porcentagem maior de fosfito comparado ao controle.

Tabela 4. Porcentagem de magnésio no caule velho (MGCV), folha velha (MGFV), caule novo (MGCN), folha nova (MGFN), raiz (MGR) e total (MGT) em plantas de laranjeira doce 'Pêra' sob porta enxerto Tangerina Sunki submetidas a aplicação foliar de diferentes fontes de magnésio (Mg).

Tratamentos	MGCV	MGFV	MGCN	MGFN	MGR	MGT
	----- % -----					
CONTROLE	0,81 b	14,55 a	17,01	13,65 b	1,11 b	3,95 b
S500	1,02 a	15,26 a	13,21	14,22 b	1,74 a	4,63 a
N500	1,10 a	17,44 a	16,97	20,36 a	1,31 b	4,77 a
P500	1,05 a	12,09 b	16,54	16,59 b	1,56 a	4,28 b
Teste F	*	**	ns	**	*	*

*: significativo a 5% pelo teste F; **: significativo a 1% pelo teste F; ns: não significativo. Letras minúsculas representam a diferença estatística pelo teste de médias 'Scott-Knott' entre os tratamentos na dose 500 mg L⁻¹ de sulfato de Mg (S500), 500 mg L⁻¹ de nitrato de Mg (N500) e 500 mg L⁻¹ de fosfito de Mg (P500).

Em DIC (Tabela 5), a quantidade de Mg diferiu apenas na secção do caule velho, resultado já encontrado no delineamento fatorial.

Tabela 5. Quantidade de magnésio no caule velho (MGCV), folha velha (MGFV), caule novo (MSCN), folha nova (MGFN), raiz (MGR) e total (MGT) em plantas de laranjeira doce 'Pêra' sob porta enxerto Tangerina Sunki submetidas a aplicação foliar de diferentes fontes de magnésio (Mg).

Tratamentos	MGCV	MGFV	MGCN	MGFN	MGR	MGT
	----- g Mg . kg planta ⁻¹ -----					
CONTROLE	0,71 b	2,92	1,19	3,25	1,00	9,07
S500	0,79 b	2,93	1,14	3,19	1,28	9,34
N500	0,93 a	2,83	1,21	3,44	0,94	9,35
P500	0,89 a	2,68	1,18	3,31	1,30	9,37
Teste F	*	ns	ns	ns	ns	ns

*: significativo a 5% pelo teste F; **: significativo a 1% pelo teste F; ns: não significativo. Letras minúsculas representam a diferença estatística pelo teste de médias 'Scott-Knott' entre os tratamentos na dose 500 mg L⁻¹ de sulfato de Mg (S500), 500 mg L⁻¹ de nitrato de Mg (N500) e 500 mg L⁻¹ de fosfito de Mg (P500).

6. CONCLUSÃO

A fonte à base de nitrato em concentrações mais elevadas apresentou maior efetividade no aporte de Mg a curto prazo, portanto, pode-se afirmar que a fonte nítrica de Mg acelera o processo de absorção da planta e apresenta viabilidade para quem busca resposta a curto prazo. Com relação as enzimas antioxidantes, o fósforo, não demonstrou atuar de forma efetiva no combate de estresses bióticos e abióticos. Entretanto, o sulfato na dose de 125 mg L^{-1} apresentou uma robustez no sistema de defesa antioxidante a longo prazo. Acerca do comportamento da planta ao estresse nutricional de Mg, ficou evidente a promoção de um elevado crescimento de brotos novos antes da segunda coleta e maior crescimento radicular, assim como as diversas deficiências apresentadas pelo aparato fotossintético. Conclui-se que, as respostas obtidas nos tratamentos propiciam o aumento na busca pelo melhor entendimento a respeito das vias metabólicas responsáveis pela assimilação do Mg via fontes nítricas, sulfatadas e fosfáticas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. LI, C. P. *et al.* Alterações induzidas pela deficiência de magnésio na troca gasosa, principais metabólitos e enzimas-chave diferem entre raízes e folhas inferiores e superiores de mudas de *Citrus sinensis*. *Tree Physiology*, v. 37, n. 11, p. 1564–1581, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1093/treephys/tpx067>. Acesso em: 30 out. 2025.
2. FISCHER, I. H. *et al.* Atividade de fosfitos e quitosana nas respostas bioquímicas e no controle da mancha-alvo em plantas de pepino. *Gesunde Pflanzen*, v. 75, n. 4, p. 825–835, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00761-9>. Acesso em: 30 out. 2025.
3. HAUER-JÁKLI, M.; TRÄNKNER, M. Limiares críticos de magnésio foliar e o impacto do magnésio no crescimento e defesa foto-oxidativa das plantas: uma revisão sistemática e meta-análise de 70 anos de pesquisa. *Frontiers in Plant Science*, v. 10, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00766>. Acesso em: 30 out. 2025.
4. GEMIN, L. G. *et al.* Polissacarídeos combinados a cobre e magnésio melhoram o crescimento, a produtividade, a atividade antioxidante e as enzimas de defesa em tomateiros. *Scientia Horticulturae*, v. 310, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111752>. Acesso em: 30 out. 2025.
5. KUMAR, R. *et al.* Resposta da rosa-damascena (*Rosa damascena* Mill.) à aplicação foliar de sulfato de magnésio (Mg), cobre (Cu) e zinco (Zn) no Himalaia Ocidental. *Industrial Crops and Products*, v. 83, p. 596–602, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.12.065>. Acesso em: 30 out. 2025.
6. PUTHIYAVEETIL, S.; VAN OORT, B.; KIRCHHOFF, H. Dinâmica de carga superficial em membranas fotossintéticas e suas consequências estruturais. *Nature Plants*, v. 3, p. 17020, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/nplants.2017.20>. Acesso em: 30 out. 2025.
7. ZE, Y. *et al.* Influências da deficiência de magnésio e do cério no sistema antioxidante de cloroplastos de espinafre. *Biometals*, v. 22, p. 941–949, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10534-009-9246-z>. Acesso em: 30 out. 2025.
8. REHMAN, H. *et al.* Aplicação integrativa de magnésio e bioestimulante orgânico induz mudanças fisiológicas e bioquímicas em girassóis e em sua progênie cultivada em solo arenoso. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 126, p. 97–105, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.02.031>. Acesso em: 30 out. 2025.
9. JEZEK, M. *et al.* Capacidade fotossintética, status nutricional e crescimento do milho (*Zea mays* L.) após aplicação foliar de MgSO₄. *Frontiers in Plant Science*, v. 5, p. 1–10, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00781>. Acesso em: 30 out. 2025.
10. CHEN, H. *et al.* A nutrição amoniacal inibe o crescimento e a absorção de nitrogênio em mudas de citros. *Scientia Horticulturae*, v. 272, p. 109526, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109526>. Acesso em: 30 out. 2025.

11. FUNDECITRUS. *Safra de laranja 2025/26 do cinturão citrícola de SP e MG é estimada em 314,60 milhões de caixas*. 2025. Disponível em: <https://www.fundecitrus.com.br/noticias/safra-de-laranja-202526-do-cinturao-citricola-de-sp-e-mg-e-estimada-em-31460-milhoes-de-caixas/>. Acesso em: 30 out. 2025.
12. SILVA, D. M. *Deficiência de magnésio na fisiologia e no metabolismo antioxidante de cultivares de cafeeiro*. 2023. 145 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. Disponível em: <https://sbicafe.ufv.br/server/api/core/bitstreams/59b48a65-b2fc-4749-b828-0cec44cc7616/content>. Acesso em: 30 out. 2025.
13. CEPEA. *Maior volume de suco de laranja enviado aos EUA quase compensa queda para a Europa*. 2025. Disponível em: <https://www.cepea.org.br/en/brazilian-agribusiness-news/higher-volume-of-oj-sent-to-the-us-almost-compensates-decrease-to-europe.aspx>. Acesso em: 30 out. 2025.
14. MOHAMMADI, M. A. *et al.* Aplicação de fosfito alivia *Phytophthora infestans* pela modulação de metabólitos fotossintéticos e fisiológicos em folhas de batata. *Pathogens*, v. 9, n. 3, p. 170, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/pathogens9030170>. Acesso em: 30 out. 2025.
15. ZAMBROSI, F. C. B. *et al.* Danos anatômicos e ultraestruturais em folhas de citros devido à aplicação de fosfito dependem do suprimento de fósforo às raízes. *Plant and Soil*, v. 418, p. 557–569, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3314-x>. Acesso em: 30 out. 2025.
16. ALTARUGIO, L. M. *et al.* Desempenho produtivo de soja e milho submetidos à pulverização foliar de magnésio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 52, n. 12, p. 1185–1191, dez. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017001200007>. Acesso em: 30 out. 2025.
17. CHEN, L. *et al.* Deficiência de magnésio diferencia os efeitos no crescimento das raízes e no metabolismo da parte aérea ao regular a distribuição dos produtos fotossintéticos em plantas de chá. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v. 26, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113748>. Acesso em: 12 nov. 2025.
18. HE, Hongsu *et al.* Alterações na partição de biomassa vegetal, nutrientes teciduais e estado de carboidratos em mudas de bananeira com deficiência de magnésio e potencial de correção pela aplicação foliar de magnésio. *Scientia Horticulturae*, v. 268, p. 109377, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109377>. Acesso em: 12 nov. 2025.
19. LIU, Xiaoman *et al.* A aplicação de magnésio mitiga danos por queimadura solar em frutos cítricos ao aumentar a eficiência fotossintética e a defesa antioxidante. *Scientia Horticulturae*, v. 351, p. 114408, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2025.114408>. Acesso em: 12 nov. 2025.
20. CHEN, Liuru *et al.* Efeitos diferenciados da deficiência de magnésio no crescimento das raízes e metabolismo da parte aérea pela regulação da distribuição

de produtos fotossintéticos em plantas de chá. *Scientia Horticulturae*, v. 338, p. 113748, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113748>. Acesso em: 12 nov. 2025.

21. LIU, Xiaoman *et al.* Efeito da aplicação de magnésio na coloração dos frutos e no acúmulo de açúcares da laranja-de-umbigo. *Scientia Horticulturae*, v. 304, p. 111282, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111282>. Acesso em: 12 nov. 2025.

22. SONG, Liuli *et al.* A aplicação pós-colheita de 1-metilciclopropeno atrasa o amarelamento das folhas de acelga chinesa ao melhorar a capacidade antioxidante do cloroplasto e manter sua integridade estrutural durante o armazenamento a 20 °C. *Scientia Horticulturae*, v. 270, p. 109466, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109466>. Acesso em: 12 nov. 2025.

23. CAKMAK, Ismail; YAZICI, A. Magnésio: um elemento esquecido na produção agrícola. *Melhores colheitas com alimentos vegetais*, v. 94, p. 23–25, 2010. Disponível em: <http://www.ks-minerals-and-agriculture.com/de/pdf-articles/article-201006-better-crops-magnesium.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2025.

24. AYRE, Brian G. Sistemas de transporte de membrana para sacarose em relação ao particionamento de carbono em toda a planta. *Molecular Plant*, [S. l.], v. 4, n. 3, p. 377-394, maio 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/mp/ssr014>. Acesso em: 12 nov. 2025.

25. BOARETTO, R. M. *et al.* O possível papel do fornecimento extra de magnésio e nitrogênio para aliviar o estresse causado por alta irradiação e temperatura em limoeiros. *Plant and Soil*, [S. l.], v. 457, p. 57–70, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04597-y>. Acesso em: 12 nov. 2025.

26. CHAUDHRY, A. H. *et al.* Compreensões atuais sobre a deficiência de magnésio e perspectivas futuras para uma agricultura sustentável. *International Journal of Molecular Sciences*, [S. l.], v. 22, n. 4, p. 1819, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijms22041819>. Acesso em: 12 nov. 2025.

27. GRANSEE, A.; FÜHRS, H. Mobilidade do magnésio em solos como um desafio para a análise de solo e planta, fertilização com magnésio e absorção radicular sob condições adversas de crescimento. *Plant and Soil*, v. 368, p. 5–21, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1567-y>. Acesso em: 12 nov. 2025.

28. HERMANS, C. *et al.* Deficiência de magnésio em beterraba sacarina altera a partição de açúcares e o carregamento do floema em folhas jovens maduras. *Planta*, v. 220, p. 541–549, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00425-004-1376-5>. Acesso em: 12 nov. 2025.

29. CEYLAN, Y.; KUTMAN, U. B.; MENGUTAY, M.; CAKMAK, I. Aplicações de magnésio ao meio de crescimento e à folhagem afetam a distribuição de amido, aumentam o tamanho do grão e melhoram a germinação das sementes em trigo. *Plant and Soil*, v. 406, p. 145–156, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2871-8>. Acesso em: 12 nov. 2025.

- 30.** TADAYON, M. S. O papel do manejo nutricional na melhoria dos sintomas do declínio dos citros. *Journal of Plant Nutrition*, v. 43, n. 10, p. 1555–1570, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1730897>. Acesso em: 10 dez. 2025.
- 31.** COSKUN, T. A.; HORUZ, S. Fosfitos para o manejo do cancro bacteriano e da podridão do caule do tomateiro. *Journal of Plant Diseases and Protection*, v. 130, p. 609–617, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41348-023-00725-9>. Acesso em: 10 dez. 2025.
- 32.** MOHAMMADI, M. A. et al. A aplicação de fosfito alivia *Phytophthora infestans* por modulação dos metabólitos fotossintéticos e fisio-bioquímicos em folhas de batata. *Pathogens*, v. 9, n. 3, p. 170, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/pathogens9030170>. Acesso em: 10 dez. 2025.
- 33.** MAHMOUD, L. M.; KILLINY, N.; DUTT, M. Identificação de genes CAP em limadado (*Citrus australasica*) e seu papel nas respostas das plantas a estresses abióticos e bióticos. *Scientific Reports*, v. 14, p. 29557, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80868-3>. Acesso em: 10 dez. 2025.
- 34.** WANG, T. et al. Incompatibilidade de enxertia mediada por interenxerto: insights sobre pigmentos fotossintéticos, carboidratos, sistemas de defesa antioxidante e mecanismos de resposta hormonal em citros. *Plants*, v. 14, n. 4, p. 522, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants14040522>. Acesso em: 10 dez. 2025.
- 35.** LIU, Y. et al. O magnésio foliar aumenta a tolerância ao sal em arroz ao melhorar a fotossíntese e regular a homeostase iônica. *Frontiers in Plant Science*, v. 16, p. 1578023, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1578023>. Acesso em: 09 dez. 2025.
- 36.** Ye, X.; Chen, X.-F.; Deng, C.-L.; Yang, L.-T.; Lai, N.-W.; Guo, J.-X.; Chen, L.-S. Efeitos da Deficiência de Magnésio nos Pigmentos, Fotossíntese e Transporte de Elétrons Fotossintéticos das Folhas, e Nutrientes das Lâminas e Nervuras Foliaves em *Mudas de Citrus sinensis* *Plants* 2019, *8*389. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants8100389>. Acesso em: 09 dez. 2025.
- 37.** Kitajima, M. & Butler, W.L. Supressão da Fluorescência da Clorofila e da Fotoquímica Primária em Cloroplastos por Dibromotimoquinona. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)*, v. 376, p. 105–115, 1975. DOI: [https://doi.org/10.1016/0005-2728\(75\)90209-1](https://doi.org/10.1016/0005-2728(75)90209-1) Acesso em: 09 dez. 2025.