UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP)

CÂMPUS DE JABOTICABAL

COMBINAÇÃO K:MG NA ATIVIDADE DA RUBISCO, METABOLISMO FOTOSSINTÉTICO, ANTIOXIDANTE E RELAÇÕES COM A PRODUTIVIDADE DO CAFEEIRO

Nandhara Angélica Carvalho Mendes

Engenheira de Biossistemas

2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP)

CÂMPUS DE JABOTICABAL

COMBINAÇÃO K:MG NA ATIVIDADE DA RUBISCO, METABOLISMO FOTOSSINTÉTICO, ANTIOXIDANTE E RELAÇÕES COM A PRODUTIVIDADE DO CAFEEIRO

Discente: Nandhara Angélica Carvalho Mendes

Orientador: Prof. Dr. André Rodrigues dos Reis

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestra em Agronomia (Produção Vegetal).

2023

Mendes, Nandhara Angélica Carvalho

M538c Combinação K:Mg na atividade da rubisco, metabolismo fotossintético, antioxidante e relações com a produtividade do cafeeiro / Nandhara Angélica Carvalho Mendes. -- Jaboticabal, 2023

32 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: André Rodrigues dos Reis

1. Fisiologia vegetal. 2. Antagonismo mineral. 3.Cafeeiro. 4. Sustentabilidade. 5. Fotossintese. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: COMBINAÇÃO K:MG NA ATIVIDADE DA RUBISCO, METABOLISMO FOTOSSINTÉTICO, ANTIOXIDANTE E RELAÇÕES COM A PRODUTIVIDADE DO CAFEEIRO

AUTORA: NANDHARA ANGÉLICA CARVALHO MENDES
ORIENTADOR: ANDRÉ RODRIGUES DOS REIS

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Agronomia (Produção Vegetal), pela Comissão Examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
ANDRE RODRIGUES DOS REIS
Data: 21/07/2023 11:26:09-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. ANDRÉ RODRIGUES DOS REIS (Participaçao Virtual)
Departamento de Engenharia de Biossistemas / FEI UNESP Tupa

Pós-doutorando PEDRO HENRIQUE GORNI (Participaçao Virtual)
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV UNESP Jaboticabal

gov.br Documento assinado digitalmente
PEDRO HENRIQUE GORNI
Data: 21/07/2023 10:43:54-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. ADRIANA LIMA MORO (Participaçao Virtual)
Departamente do Agronomia / Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE) - Presidente Prudente/SP

gov.br Documento assinado digitalmente
ADRIANA LIMA MORO
Data: 20/07/2023 12:38:28-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Jaboticabal, 18 de julho de 2023

DADOS CURRICULARES DA AUTORA

NANDHARA ANGÉLICA CARVALHO MENDES – Nasceu em 08 de abril de 1998 em Araçatuba, SP, Brasil. Filha de Selma Regina de Oliveira Carvalho Mendes e Jorge Mendes. Mestranda no PPG em Agronomia (Produção Vegetal) pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias pela Universidade Estadual Paulista (FCAV-UNESP). Especialista em Fisiologia Vegetal, Nutrição e Desenvolvimento de Plantas pela Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP) (2023). Engenheira de Biossistemas pela "Faculdade de Ciências e Engenharia" da Universidade Estadual Paulista (FCE-UNESP) (2020). Foi pesquisadora visitante da Lancaster University – UK. Mendes possui experiência em Biofortificação Agronômica especificamente em Micronutrientes essenciais para a Saúde Humana e Segurança Alimentar, atuando principalmente com Fisiologia Vegetal, Nutrição e Desenvolvimento de Plantas. Desenvolveu projetos de pesquisa na área de Química Ambiental (2016-2018) no Laboratório de Química da Faculdade de Ciências e Engenharia de Tupã (UNESP), Brasil. Foi Bolsista de Iniciação Cientifica pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), desenvolvendo projetos na área de Fisiologia Vegetal e Nutrição de Plantas (2018-2020). Participou do III Simpósio de Ecofisiologia Aplicada à Agricultura onde recebeu o Prêmio de melhor Trabalho da sessão de Nutrição Vegetal (2020) pela Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu (UNESP), Brasil. Foi estagiária no Laboratório de Genética de Plantas (2020), do Departamento de Genética da Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto (FMRP-USP), Brasil. Integrante do grupo de estudos de Fisiologia Agrícola (GEFA). Avaliadora de projetos do Instituto Federal do Mato Grosso do Sul (IFMS), Brasil.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha amada mãe, Selma, e ao meu querido pai, Jorge. Suas constantes palavras de incentivo, amor e apoio incondicional foram a base sólida que me sustentou durante toda minha jornada. Sua presença e encorajamento foram a motivação que me impulsionou a perseverar em meio aos desafios.

Aos meus amigos, sou imensamente grata por estarem sempre ao meu lado. Em especial, gostaria de expressar minha gratidão ao Cleverson Rodrigues e ao Vinicius Martins Silva. Sua amizade, apoio e encorajamento constantes foram essenciais para superar momentos difíceis e para me manter motivado durante todo o percurso.

Ao meu orientador Prof. Dr. André Rodrigues dos Reis, meu profundo agradecimento por sua orientação, conhecimento e expertise. Suas contribuições foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho e para o meu crescimento acadêmico. Sou grata por ter tido a oportunidade de aprender com vocês e por sua dedicação em compartilhar seu conhecimento.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp) pelo financiamento concedido para este projeto de pesquisa (Processo: 2020/16177-0), juntamente com a bolsa de Estágio de Pesquisa no Exterior (BEPE) (Processo: 2022/03685-3), concedida no quarto semestre do mestrado, para a Lancaster University – UK.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal), pela oportunidade oferecida.

Por fim, agradeço a todos os servidores, professores, colegas e instituições que, direta ou indiretamente, contribuíram para o sucesso deste projeto. Seja por meio de discussões, colaborações, insights valiosos ou qualquer outra forma de apoio, cada contribuição foi significativa e valorizada.

Meus sinceros agradecimentos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1
2. REVISÃO DE LITERATURA 3
2.1. Mg em solos brasileiros 3
2.2. Papel fisiológico do Mg na planta 4
2.3. Importância da relação de K e Mg para as plantas 6
2.4. A cultura do café 11
3. MATERIAL E MÉTODOS 12
3.1. Descrição da área experimental 12
3.2. Produtividade 14
3.3. Determinação de pigmentos em folhas 14
3.4. Determinação da atividade da Rubisco (RUBP carboxilase) 15
3.5. Determinação das espécies reativas de oxigênio 15
3.6. Análises do metabolismo antioxidante 15
3.7. Análises fisiológicas e bioquímicas 16
3.7.1. Extração de compostos nitrogenados e fotoassimilados para quantificação e análise 16
3.8. Análise química das folhas do cafeeiro 18
3.9. Análise estatística 18
4. RESULTADOS 18
5. DISCUSSÃO 34
6. CONCLUSÃO 37
REFERÊNCIAS 37

COMBINAÇÃO K:MG NA ATIVIDADE DA RUBISCO, METABOLISMO FOTOSSINTÉTICO, ANTIOXIDANTE E RELAÇÕES COM A PRODUTIVIDADE DO CAFEEIRO

RESUMO

O café é a segunda bebida mais consumida em todo o mundo, ficando atrás apenas da água, e sua demanda está constantemente aumentando no mercado. No entanto, para suprir essa exigência, as técnicas de cultivo precisam superar as adversidades que afetam o desenvolvimento das plantas, sendo o café (*Coffea arabica*) particularmente afetado pela deficiência de magnésio. A carência de magnésio nas plantas de café pode ser resultado de atividades antropogênicas, como o fornecimento inadequado de fertilizantes potássicos, o que leva a um antagonismo na absorção de magnésio que prejudica a produtividade. Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos de diferentes combinações de doses de potássio e magnésio em diversos aspectos, incluindo produtividade, concentração de pigmentos fotossintéticos, atividade da enzima rubisco, metabolismo antioxidante, a translocação de açúcares e o metabolismo nitrogenado. O experimento foi conduzido em campo. Foi utilizado o delineamento experimental em blocos casualizados, com tratamentos dispostos em um esquema fatorial 4 x 4, consistindo em 4 doses de potássio (0, 150, 300 e 450 kg ha^{-1} de K_2O) e 4 doses de magnésio (0, 25, 50 e 150 kg ha^{-1} de MgO), em dois anos. Neste estudo, foram avaliados os seguintes parâmetros: produtividade, concentração de pigmentos fotossintéticos, atividade da enzima rubisco, concentração de malonaldeído e peróxido de hidrogênio, atividade da superóxido dismutase, ascorbato peroxidase e catalase, concentração de açúcar total em folhas e grãos, concentração de nitrato, amônia e de aminoácidos. A aplicação de 150 kg ha^{-1} de K_2O e 25 kg ha^{-1} de MgO resultou em aumento da produtividade, concentração dos pigmentos fotossintéticos, atividade da enzima rubisco, metabolismo antioxidante e translocação de açúcares, em ambos os anos. Este estudo apresenta novos insights fundamentais sobre o efeito de K e Mg na produtividade e no metabolismo fotossintético e antioxidante do cafeeiro.

Palavras-chave: *Coffea arabica*, antagonismo mineral, sustentabilidade, metabolismo fotossintético, estresse.

K:MG COMBINATION IN RUBISCO ACTIVITY, PHOTOSYNTHETIC METABOLISM, ANTIOXIDANT, AND THEIR RELATIONSHIP WITH COFFEE PLANT PRODUCTIVITY

ABSTRACT

Coffee is the second most consumed beverage worldwide, second only to water, and its demand is steadily increasing in the market. However, to meet this demand, cultivation techniques must overcome the adversities that affect plant development, with coffee (*Coffea arabica*) being particularly affected by magnesium deficiency. The lack of magnesium in coffee plants may result from anthropogenic activities, such as inadequate supply of potassium fertilizers, leading to an antagonism in magnesium absorption that impairs yield. This study aimed to assess the effects of different combinations of potassium and magnesium doses on various aspects, including yield, concentration of photosynthetic pigments, rubisco enzyme activity, antioxidant metabolism, sugar translocation, and nitrogen metabolism. The experiment was conducted in the field. The experimental design was randomized complete blocks, with treatments arranged in a 4 x 4 factorial scheme, consisting of 4 potassium doses (0, 150, 300, and 450 kg ha^{-1} of K_2O) and 4 magnesium doses (0, 25, 50, and 150 kg ha^{-1} of MgO), over two years. The following parameters were evaluated in the study: yield, concentration of photosynthetic pigments, rubisco activity, malondialdehyde and hydrogen peroxide concentration, superoxide dismutase, ascorbate peroxidase and catalase activity, total sugar concentration in leaves and grains, nitrate, ammonia, and amino acids concentration. The application of 150 kg ha^{-1} of K_2O and 25 kg ha^{-1} of MgO resulted in increased productivity, concentration of photosynthetic pigments, rubisco enzyme activity, antioxidant metabolism, and sugar translocation in both years. This study provides fundamental new insights into the effect of K and Mg on coffee yield and photosynthetic metabolism.

Keywords: *Coffea arabica*, mineral antagonism, sustainability, photosynthetic metabolism, stress.

1. INTRODUÇÃO

A combinação adequada de doses de potássio (K) (Torabian et al., 2021) e magnésio (Mg) (Tian et al., 2021) é um aspecto crítico da nutrição mineral de plantas e desempenham um papel fundamental no crescimento, desenvolvimento e produção vegetal.

O K é conhecido por sua importância no equilíbrio osmótico das células das plantas, na regulação da abertura e fechamento dos estômatos, na ativação de enzimas envolvidas na fotossíntese e síntese de proteínas, no transporte de açúcares e de nutrientes, e na influência das resistências das plantas a doenças e estresses abióticos (Tränkner et al., 2018; Tavakol et al., 2022). O K também desempenha um papel fundamental na síntese e acúmulo de amido, a qual é essencial para o crescimento e desenvolvimento de órgãos de armazenamento, como raízes, tubérculos e frutos.

Devido à escassez de pesquisas relacionadas ao papel fisiológico e nutricional do Mg nas plantas, esse nutriente é considerado "esquecido" dentro da nutrição de plantas, no entanto, seu papel vital está cada vez mais reconhecido (Cakmak e Yazici, 2010; Peng et al., 2018). Vários estudos abordaram os efeitos da deficiência de Mg na biossíntese da clorofila (Tränkner et al., 2016; Li et al., 2017), fotossíntese (Yuguan et al., 2009; Li et al., 2017), alocação de carboidratos (Verbruggen e Hermans, 2013; Yang et al., 2017), sistema enzimático antioxidante (Silva et al., 2017; Cai et al., 2019) e enzimas do metabolismo de nitrogênio (N) (Yin et al., 2009; Li et al., 2017).

O Mg tem funções essenciais na planta, pois faz parte da molécula de clorofila e atua na fixação do dióxido de carbono (CO_2) durante o processo da fotossíntese (Farhat et al., 2016), além de desempenhar funções cruciais nos processos fisiológicos e bioquímicos do metabolismo de carboidratos (Yang et al., 2017), na desintoxicação de espécies reativas de oxigênio (EROs) (Cakmak e Kirkby, 2008; Yang et al., 2013) e no metabolismo de N (Yang et al., 2017).

No entanto, a deficiência de Mg induz a geração de EROs como radical superóxido (O_2.-), peróxido de hidrogênio (H_2O_2), radical hidroxila (OH.) e oxigênio singleto ($^1O_2$). Plantas com deficiências em Mg apresentam menor concentração de carotenoides e clorofilas, portanto, tornam-se mais sensíveis à radiação solar. A quantidade de luz que chega nas folhas com baixa concentração de pigmentos fotossintetizantes gera uma excitação elevada da clorofila α, resultando na formação de EROs na célula vegetal. Altas concentrações de EROs têm a capacidade de oxidar ou destruir a camada lipídica da membrana celular, ocasionando o desequilíbrio de pH celular e a oxidação de pigmentos como as clorofilas, o que causa clorose internerval (Guo et al., 2016; Farhat et al., 2016).

Taxas elevadas de aplicação de fertilizantes potássicos em áreas agricultáveis é um fator que pode afetar a disponibilidade de Mg no solo, isso por que, existem fortes interações quanto à absorção entre K e Mg (Cai et al., 2012; Jezek et al., 2015), uma vez que, estes elementos minerais competem pela absorção nas raízes, e isso pode ser atribuído a diferentes sistemas de transporte, responsável pela captação destes nutrientes, e mesmo que os transportadores putativos de Mg sejam inespecíficos, os transportadores de K são bastante específicos, lhes garantindo vantagem na absorção tanto em altas como em baixas concentrações no solo, o que pode provocar a deficiência de Mg (Senbayram et al., 2015).

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café, de acordo com a Organização Internacional do Café (OIC), desfrutando de uma posição de destaque no mercado global. Além disso, o país é o segundo maior consumidor de café, ficando atrás apenas dos Estados Unidos.

A área agrícola dedicada ao cultivo de café no Brasil é vasta, abrangendo aproximadamente 2,2 milhões de hectares, resultando em cerca de 32,7 milhões de sacas, de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab, 2022).

Essa produção em larga escala apresenta desafios para os produtores de café, que precisam lidar com diversos fatores que podem afetar o desenvolvimento saudável da planta e, consequentemente, o rendimento das colheitas. Fatores bióticos e abióticos, que vão desde deficiências nutricionais até influências ambientais, representam desafios significativos para os produtores de café. Diante dessa realidade, é essencial que os produtores de café busquem estratégias eficazes para mitigar efeitos adversos e garantir níveis elevados de rendimento.

Nos últimos anos, tem sido relatada a deficiência visual de Mg em cafeeiros nas várias regiões produtoras, com prejuízo da produção, em razão da granação deficiente e pela formação de grãos chochos. Clorose entre as nervuras no limbo das folhas mais velhas é o sintoma apresentado pela deficiência desse nutriente. Com o passar do tempo a coloração amarela se torna parda ou marrom, seguindo da queda das folhas.

Em virtude da real demanda de Mg pelas plantas, e das relações antagônicas na absorção destes macronutrientes, evidencia-se a necessidade de estudos aprofundados sobre o assunto. Portanto, a hipótese desse estudo foi que recomendações das doses ideais de K:Mg evita a clorose, aumenta a eficiência fotossintética para a produção de açúcares e aumenta a produtividade dos cafeeiros.

Deste modo, o objetivo desse trabalho foi avaliar a combinação de doses de K e Mg na atividade fotossintética, rubisco, metabolismo antioxidante e reflexos na produtividade do cafeeiro arábica cv. Mundo Novo numa lavoura com 8 anos de idade.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Mg em solos brasileiros

As pesquisas na área da ciência do solo no Brasil promoveram a incorporação de vastas áreas de terras que não eram cultivadas, por serem consideradas inadequadas para a produção de alimentos. Limitações naturais destes solos, como acidez, altos teores de óxidos de ferro e alumínio, baixa capacidade de troca de cátions e baixos teores de matéria orgânica, foram superadas, modificando-se estes solos em terras altamente produtivas para a agricultura (Buol, 2009).

Neste contexto, os solos da região do Cerrado apresentam baixa fertilidade natural, constituindo importante entrave para a realização da agricultura, uma vez que os solos são muito ácidos, com pouca matéria orgânica e baixa disponibilidade de Mg, fósforo (P) e zinco (Zn) (Dechen et al., 2015).

Em relação ao macronutriente Mg, verifica-se que é o sétimo elemento mineral mais abundante da crosta terrestre, onde sua concentração atinge 23,3 g kg^{-1} em média (Heynes, 2014). O conteúdo de Mg nos solos varia de 0,1% a 4%, conforme a textura apresentada pelos mesmos. A disponibilidade de Mg no solo não depende exclusivamente do potencial do solo em armazenar e liberar este cátion, já que são altos os índices de lixiviação do Mg e os níveis de cálcio, potássio e amônio que afetam a disponibilidade deste macronutriente. Ressalta-se que as mais baixas concentrações de Mg encontradas nos solos brasileiros ocorrem no cerrado, onde são altos o grau de lixiviação e intemperismo (Wlend, 2007).

Pode-se considerar que os solos do Brasil são pobres em Mg, visto que a baixa concentração e disponibilidade de Mg no solo podem proporcionar a diminuição do Mg disponíveis para as plantas, menor acúmulo de Mg nas sementes, inibição do crescimento das plantas, além de acelerar a senescência e reduzir a qualidade e a produtividade dos vegetais (Nardeli et al., 2016).

Neste sentido, verificou-se que em pesquisa realizada no Brasil com amostras de solo coletadas sob vegetação de Cerrado, os níveis de Mg permutáveis estavam abaixo do nível crítico

de 0,5 cmolc L^{-1} em 90% das áreas observadas (Lopes, 1983). Em estudos com níveis de troca de Mg na camada de solo 0-30 cm, observou-se que a maioria das áreas com vegetação de cerrado é considerada como baixa em Mg (Benites et al., 2010).

Entre as práticas agrícolas adotadas pelos agricultores para obter incrementos na produtividade, o adequado fornecimento de nutrientes ao solo é o que produz os melhores resultados. Constatou-se que a maneira mais fácil e econômica de fornecer Mg para as culturas é através da calagem (Malavolta, 2006). No entanto, o calcário dolomítico deve ser usado com cuidado, evitando assim a elevação excessiva do valor de pH do solo (Sengik, 2003).

Recentemente, outras fontes de Mg têm aparecido com alternativa, como o óxido de Mg, nitrato de Mg, e o sulfato de Mg.

2.2. Papel fisiológico do Mg na planta

O Mg é considerado um elemento mineral essencial para as plantas e como parte integrante do ambiente abiótico, a sua disponibilidade tem um efeito preponderante sobre a atividade biológica, exercendo influência no crescimento e no vigor das plantas (Huber e Jones, 2013).

A necessidade de Mg para o crescimento ótimo da planta é de 1,5 a 3,5 g kg^{-1} em partes vegetativas. Altas concentrações de Mg podem melhorar a qualidade nutricional das plantas. O Mg desempenha uma função importante como átomo central da molécula de clorofila, com papel fundamental para a realização da fotossíntese. Além disso, o Mg atua na síntese de proteínas e ácidos nucléicos, no equilíbrio entre cátion e ânions e nas regulações do pH celular, do turgor das células e das atividades das enzimas. É importante destacar que em altas concentrações de Mg e em pH acima de 6, pode ocorrer aumento na atividade de diversas enzimas como a rubisco (RuBP carboxilase) que age na fixação do CO_2 atmosférico durante o processo fotossintético (Hawkesford et al., 2012).

O Mg apresenta diversas funções na fotossíntese, sendo constituinte da clorofila e atuando no controle do empilhamento de tilacoides. Além disso, muitas reações enzimáticas requerem ou são promovidas pelo Mg. Em situações de deficiência do Mg, o crescimento das plantas é inibido, uma vez que ocorre destruição da síntese de clorofila e as atividades da rubisco (RuBP carboxilase) são significativamente prejudicadas (Yuguan et al., 2009). As taxas fotossintéticas das plantas são prejudicadas com a diminuição das concentrações de Mg no tecido foliar, e a síntese de clorofila e

a fixação de CO_2 são afetadas pelo mesmo ponto crítico de baixa concentração de Mg (Dorenstouter et al., 1985). Em resumo, o Mg desempenha um papel crucial na fotossíntese e no crescimento saudável das plantas, sendo essencial para o funcionamento adequado dos processos metabólicos.

A deficiência de Mg na planta pode levar ao aumento da concentração de açúcar e alterar a exportação de sacarose nas folhas jovens, antes que qualquer efeito seja notado sobre a atividade fotossintética do vegetal. O declínio da fotossíntese pode ser induzido pelo aumento das concentrações de açúcar na folha. Estudos de análise de dados transcricionais responsáveis pela formação de clorofila sugerem que a redução da síntese de clorofila é uma resposta ao acréscimo nos níveis de açúcar, não apresentando relação direta a falta de átomos de Mg para a composição da clorofila (Hermans e Verbruggen, 2005).

A deficiência de Mg exerce uma grande influência na partição de carboidratos entre brotos e raízes, pois desempenha um papel fundamental no carregamento de sacarose pelo floema. Em situação de carência de Mg, a exportação de sacarose no floema é gravemente prejudicada, um efeito que ocorre antes de quaisquer mudanças visíveis na concentração de clorofila ou na atividade fotossintética (Tanoi e Kobayashi, 2015).

Uma das reações bioquímicas nos vegetais em resposta a deficiência de Mg está associada ao acúmulo maciço de carboidratos nas folhas de origem, especialmente de sacarose e amido, constituindo-se um indicativo de uma grave insuficiência na exportação de fotoassimilados pela fonte, via floema (Cakmak e Kirby, 2008).

Essa acumulação de carboidratos nas folhas pode levar a um desequilíbrio no metabolismo e prejudicar o transporte eficiente de açúcares para as partes da planta que necessitam deles para o crescimento e desenvolvimento adequados. A deficiência de Mg tem, portanto, um impacto significativo no transporte de nutrientes e na partição de carboidratos nas plantas, afetando sua capacidade de desenvolver-se e crescer de forma saudável.

Os cloroplastos são bem equipados com enzimas do metabolismo antioxidativo para remover as EROs e minimizar os efeitos peroxidativos. Esse sistema é dividido entre enzimático composto pelas enzimas superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), ascorbato peroxidase (APX) e glutationa redutase (GR), e sistema não oxidante, constituído por ácido ascórbico, tocoferóis, carotenoides, flavonoides e açúcares. A Figura 1 ilustra o sintoma de clorose causado pela radiação solar devido a deficiência de Mg. Alta intensidade luminosa leva a danos fotooxidativos e plantas de café são muito sensíveis a luz, pois sua origem é regiões sombreadas.

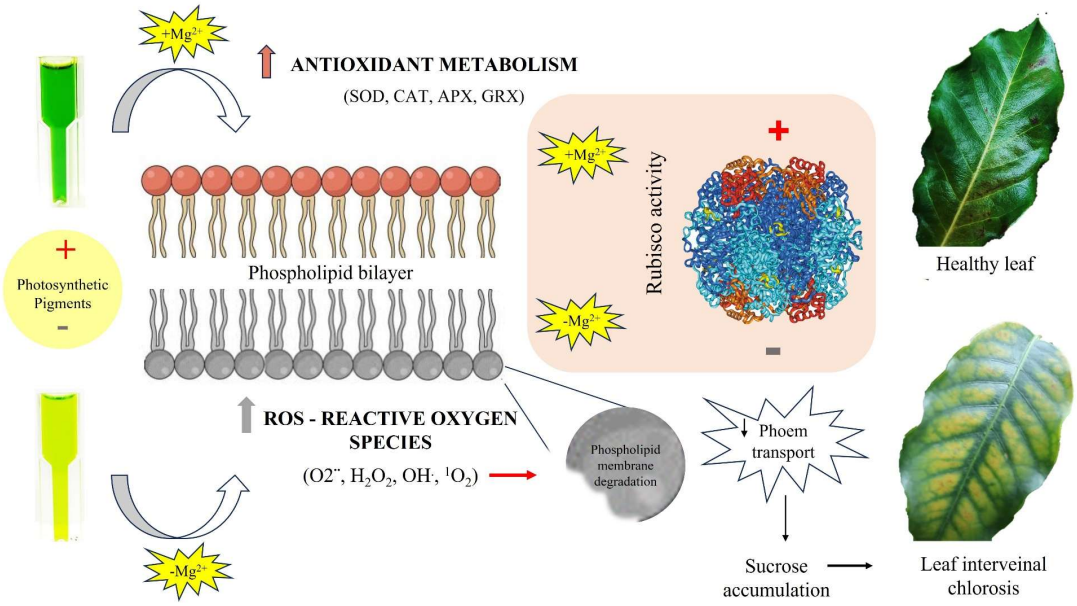


Figura 1. Modelo esquemático do efeito do Mg no metabolismo fotossintético e antioxidante em cafeeiros. Fonte: próprio autor.

A aplicação desequilibrada de fertilizantes em áreas agrícolas também pode favorecer a redução de Mg nos solos. Nas práticas agrícolas modernas, a fertilização das culturas agrícolas muitas vezes se concentrado apenas na aplicação de Nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), negligenciando outros nutrientes importantes, como o Mg.

O Mg pode interagir antagonicamente com outros íons no solo, e isso pode resultar em uma menor disponibilidade de Mg para as raízes das plantas. Esse desiquilíbrio na fertilização pode levar à deficiência de Mg nas culturas agrícolas nas últimas décadas (Cakmak e Yazici 2010). Em particular, altos níveis de íons potássico e amônio (NH_{4+}) (Chen et al. 2017), prejudicando sua absorção pelas plantas.

2.3. Importância da relação de K e Mg para as plantas

O Mg e o K são nutrientes importantes nos processos fotossintéticos e à translocação do fotossintato. Em uma ampla faixa de concentração de K e Mg nas folhas, as taxas de assimilação fotossintética de CO_2 são estáveis. No entanto, um declínio na taxa de assimilação líquida é observado quando um dos nutrientes não pode ser absorvido pela planta (Farhat et al., 2016). Os efeitos primários da deficiência de K, que podem estar associados a uma redução da capacidade

fotossintética ou assimilação de CO_2, são: diminuição da síntese proteíca e, portanto, quantidade de rubisco; alterações anatômicas na estrutura foliar reduzindo a condutância do mesofilo e ultraestrutura do cloroplasto como ilustrado na (Figura 2) (Thänkner et al., 2018). Tanto o K quanto o Mg afetam diretamente a carga de sacarose no floema, e a deficiência desses nutrientes resulta em um acúmulo de sacarose nos tecidos de origem, causando redução adicional na atividade da rubisco (Cakmak et al., 1994).

Existem inúmeros efeitos da anatomia vegetal, fisiologia e bioquímica na fotossíntese, translocação do fotossintato e fotoproteção sob condições de deficiência de K e Mg (Figura 2) que são caracterizados por interações complexas e mecanismos inter- regulatórios, no entanto, novos estudos precisam ser realizados para responder muitas questões. Na Tabela 1 são apresentados diversos estudos que abordam o papel fisiológico do K e do Mg na fotossíntese, nas EROs e na relação com a produtividade. Esses trabalhos fornecem informações importantes sobre o impacto desses elementos na eficiência da fotossíntese, nos processos de estresse oxidativo e no desempenho produtivo das plantas.

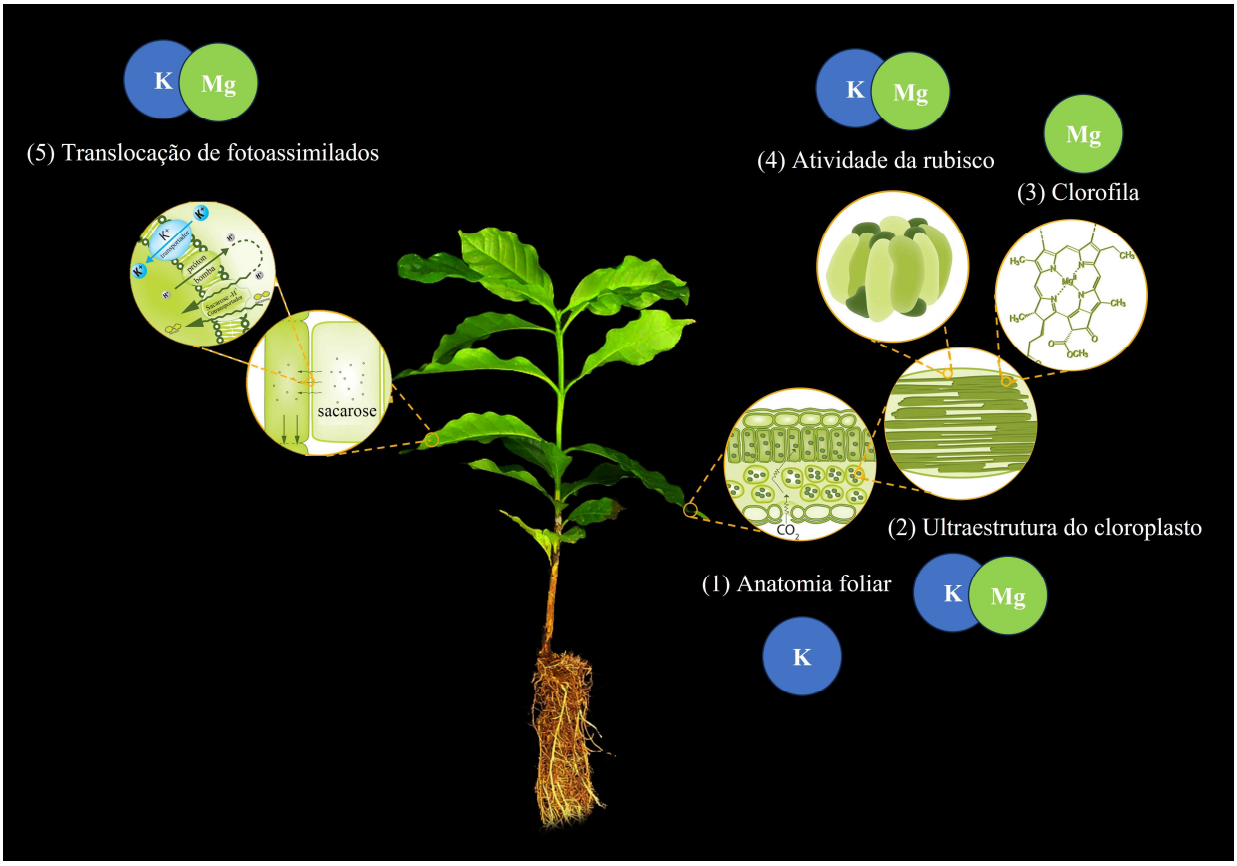


Figura 2. Localização de respostas anatômicas, fisiológicas e bioquímicas em plantas à deficiência de K e Mg que estão relacionadas à fotossíntese e translocação de fotoassimilados. 1) A deficiência

de K altera a anatomia foliar e, portanto, a difusão do mesofilo de CO_2. 2) As deficiências de K e Mg alteram a ultraestrutura dos cloroplastos. 3) Mg é o átomo central do pigmento da clorofila e necessário para sua biossíntese. 4) Tanto o K quanto o Mg reduzem a quantidade e a atividade da rubisco e o Mg também atua na ativação da rubisco. 5) K e Mg são necessários para a translocação fonte - dreno de fotoassimilados, visto que eles têm funções importantes no carregamento de sacarose no floema apoplástico. Fonte: Adaptação (Thänkner et al., 2018).

Tabela 1. Papel fisiológico do K e Mg na fotossíntese, EROs, e relação com a produtividade

Família de plantas	**Espécies de plantas**	**K/Mg**	**unit**	**Fonte**	**Formas de aplicação**	**Testes**	**Observação (Fotossíntese, EROs, fotossíntese, atividade da rubisco e produtividade)**	**Referências**
Juglandaceae	*Carya cathayensis Sarg.*	1 a 5	mM	Sulfato de potássio	Solução nutritiva	Hidroponia	↑ concentração de K em folhas, ↑ concentração de clorofila total, ↑ taxa liquída de assimilação de CO_2	Jin et al., (2011)
Fabaceae	*Glycine max*	500	g ha^{-1}	Cloreto de magnésio	Foliar	Campo	↑ trocas gasosas, ↑ rubisco, ↑ açúcar total, ↑ SOD, ↑ CAT, ↓ H_2O_2	Rodrigues et al., (2021)
Poaceae	*Zea mays L.*	500	g ha^{-1}	Cloreto de magnético	Foliar	Campo	↑ trocas gasosas, ↑ carboxilação da PEP, ↑ rubisco, ↑ açúcar total, ↑ SOD, ↑ APX, ↑ CAT, ↓ MDA, ↓ H_2O_2, ↓ prolina	Rodrigues et al., (2021)
Oleaceae	*Olea europaea cv Rashid*	2	%	Sulfato de potássio	Foliar	Campo	↑ concentração de K em folhas, ↑ resistência (estresse por frio), ↑ carboidrato, ↑ prolina, ↑ proteína total, ↑ concentração de fenol, ↑ ativação do sistema antioxidante	Saadati et al., (2021)
Fabaceae	*Glycine max*	2.5	%	Sulfato de potássio	Foliar	Casa de vegetação	↑ teor de flavonoides e polifenóis total, ↑ concentração de pigmentos fotossintéticos, ↑ atividade do sistema antioxidante	Adhikari et al., (2020)

Poaceae	*Zea mays* L.	500	g ha^{-1}	Cloreto de magnésio	Foliar	Campo	↑ trocas gasosas, ↑ rubisco e atividade de carboxilação da PEP, ↑ Eliminação de EROs; ↓ EROs, ↑ fotossíntese, ↑ eficiência de carboxilação, ↑ eficiência do uso da água	Rodrigues et al. (2021)
Fabaceae	*Glycine max*	500	g ha^{-1}	Cloreto de magnésio	Foliar	Campo	↑ trocas gasosas, ↑ rubisco, ↑ eliminação de EROs; ↓ EROs, ↑ fotossíntese, ↑ eficiência de carboxilação, ↑ eficiência do uso da água	Rodrigues et al. (2021)
Poaceae	*Hordeum vulgare*	0,1 e 0,4	mM	Cloreto de magnésio	Solução nutritiva	Hidroponia	↓ EROs, ↓ enzimas antioxidantes	Tränkner et al., (2016)
Rutaceae	*Citrus grandis e Citrus sinenesis*	500	uM	Cloreto de magnésio	Areia de rio	Vasos	↑ fotossíntese, ↓ APX, ↓ GR, ↓SOD, ↓GR, ↑CAT	Yang et al., (2012)
Fabaceae	*Vicia faba*	50	mM	Cloreto de magnésio	Mistura de areia e turfa	Vasos	↑ prolina, ↑ clorofila total, ↑ CAT, ↑ Rubisco, ↓ MDA, ↓ H_2O_2	Siddiqui et al., (2018)

2.4. A cultura do café

O café arábica (*Coffea arabica* L.) é uma planta perene e o primeiro centro de diversidade ao sudoeste das terras altas da Etiópia, no continente africano, em altitudes entre 1000 e 2000 metros (Ferreira et al., 2019). Essa região é caracterizada por altitude elevada e boas condições hídricas de precipitação (Ferrão, 2004). Posteriormente, o café foi levado à Arábia e, a partir de lá, difundiu-se mundialmente através da Europa.

No Brasil o café arábica é produzido em todo território nacional, mas desenvolve-se melhor em regiões com altitudes superiores a 1000 m, de clima ameno, temperaturas médias de 19 a 22 ºC e precipitações bem distribuídas ao longo do ano (Guimarães et al., 2019). Essas condições proporcionam um ambiente favorável para o cultivo e crescimento saudável do café arábica, contribuindo para a obtenção de grãos de alta qualidade. O café arábica é valorizado por seu sabor suave e aroma complexo, sendo uma das variedades mais apreciadas por amantes de café em todo o mundo.

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café, desfrutando de uma posição de destaque no mercado global. Além disso, o país é o segundo maior consumidor de café, ficando atrás apenas dos EUA.

A área agrícola cultivada com café no Brasil é extensa, abrangendo aproximadamente 2,2 milhões de hectares, alcançando aproximadamente 32,7 milhões de sacas, de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab, 2022).

Essa produção em larga escala apresenta desafios para os cafeicultores, que precisam lidar com diversos fatores que podem afetar o desenvolvimento saudável da planta e, consequentemente, a produtividade das lavouras. Fatores como o clima, com suas adversidades bióticas e abióticas, representam desafios para os cafeicultores, que devem buscas estratégias para minimizar os efeitos negativos e garantir altas produtividades.

Além das qualidades organolépticas, o café também possui diversas qualidades nutricionais, que são benéficas ao organismo humano. Estudos provam evidências do efeito benéfico do consumo de café na função renal, prevenindo e inibindo a progressão de doenças renais crônicas (Kennedy et al., 2020). A cafeína, principal composto do café, possui propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias que podem reduzir o estresse oxidativo, aumentando os leveis de GSH no plasma sanguíneo (Metro et al., 2017). Os antioxidantes contidos no café também protegem contra a peroxidação lipídica (Davì et al., 2005), e exercem efeito protetor sobre o diabetes mellitus tipo 2,

reduzindo a prevalência de hiperglicemia recém-detectada (Van dam; Hu e 2005). Assim como, o consumo regular da bebida está associado à redução da incidência de diversas doenças como aterosclerose, Alzheimer, Parkinson e câncer, devido aos efeitos benéficos de polifenóis e melanoidinas (Metro et al., 2017; Borrelli et al., 2002).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição da área experimental

O experimento foi realizado em uma fazenda comercial pertencente à Café Granchelli, localizada na cidade de Garça-SP, Brasil, ao longo de dois anos, em 2021 e 2022. A Figura 3 apresenta os dados de precipitação e temperatura média durante esse período experimental.

O solo é classificado como um Latossolo Vermelho Amarelo (Santos et al., 2018). As análises químicas do solo (Raij et al., 1997) apresentaram as seguintes características: pH $CaCl_2$ = 5,1, matéria orgânica = 21 g dm^{-3}, Ca = 22 mmolc dm^{-3}, P_{res} = 66 mg dm^{-3}, K = 3,1 mmolc dm^{-3}, Al = 1 mmolc dm^{-3}, H+Al = 29 mmolc dm^{-3}, Mg = 13 mmolc dm^{-3}, S = 5 mg dm^{-3}, Fe = 233 mg dm^{-3}, Mn = 4,1 mg dm^{-3}, Zn = 2,3 mg dm^{-3}, B= 0.29 mg dm^{-3}, Cu = 33,9 mg dm^{-3}, Ni = < 0.01 mg dm^{-3}, e V% = 56,8.

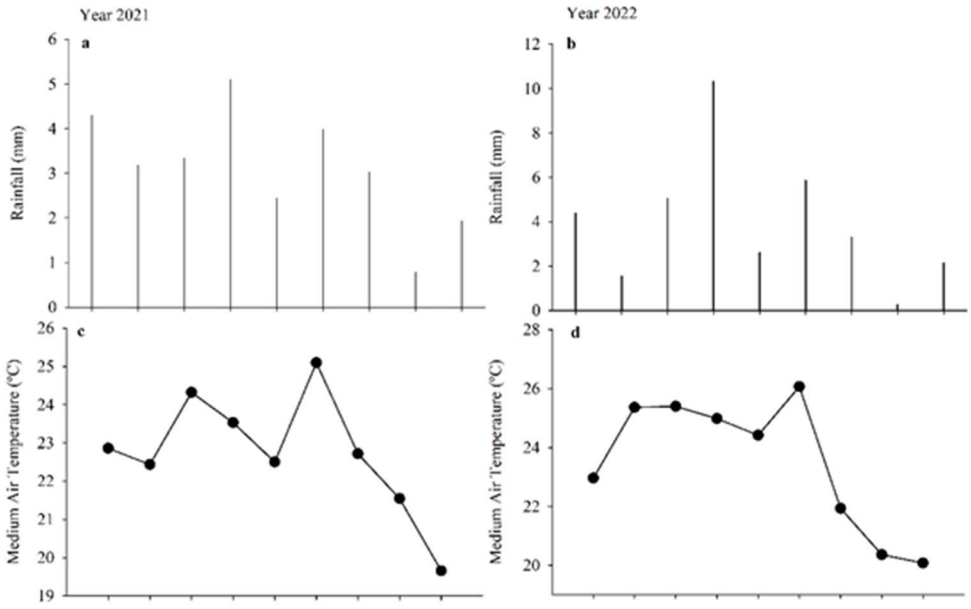


Figura 3. Precipitação (a-b) and temperatura média (c-d) registradas durante o período do experimento.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso em esquema fatorial 4x4, sendo 4 doses de K (0, 150, 300 e 450 kg ha^{-1} de K_2O) e 4 doses de Mg (0,25, 50, 150 kg ha^{-1} MgO), totalizando 16 tratamentos, com quatro repetições para cada tratamento, totalizando 64 parcelas. Os tratamentos estão dispostos na Tabela 2. O K foi fornecido na forma de Cloreto de potássio (60% de K_2O) e o Mg como Sulfato de magnésio ($MgSO_4$). Vale salientar, que o $MgSO_4$ possui 9% de MgO e 11% de enxofre (S), assim houve a necessidade de suplementação de S para todos os tratamentos.

Tabela 2 : Combinação de doses de K e Mg aplicadas no cafeeiro antes da antese

Tratamentos	**Doses de K_2O (kg ha^{-1})**	**Doses de MgO (kg ha^{-1})**
1	0	0
2	0	25
3	0	50
4	0	150
5	150	0
6	150	25
7	150	50
8	150	150
9	300	0
10	300	25
11	300	50
12	300	150
13	450	0
14	450	25
15	450	50
16	450	150

A combinação de K e Mg foi aplicada no cafeeiro *Coffea arabica* cv. Mundo Novo. A área de café, que já alcançou a maturidade fisiológica e a estabilidade de produção, foi implantada em 2015. Cada um dos tratamentos foi composto por um conjunto de 10 plantas. As 8 plantas centrais da parcela foram consideradas úteis. O espaçamento entre as fileiras era de 4 m, e entre as plantas era de 0,7 m, resultando em uma área de 84 m² por parcela. As parcelas foram separadas umas das outras por uma fileira de plantas nas laterais.

Os tratamentos foram aplicados antes da antese da planta devido à alta atividade metabólica da planta, além do potencial de um efeito maior na produção da planta de café. Os tratamentos foram aplicados em 25 de outubro de 2021 e em 5 de novembro de 2022, os quais foram distribuídos na parte basal do cafeeiro em ambos os lados.

Folhas de diagnóstico do café (3º par de folhas a partir do ápice do ramo plagiotrópico) foram coletadas 4 semanas após os tratamentos para ensaios bioquímicos e avaliação do estado de nutrição mineral (Reis et al., 2015). As folhas coletadas foram imediatamente congeladas em nitrogênio líquido e armazenadas em um congelador a -80°C para análises bioquímicas subsequentes, avaliação de pigmentos fotossintéticos, atividade da enzima rubisco, metabolismo antioxidantes, fotoassímilados e metabolismo nitrogenado.

3.2. Produtividade

Durante a fase de maturação ideal do cafeeiro, procedeu-se à colheita dos grãos para preservar a qualidade do café. A estimativa da produção baseou-se nas massas totais de grãos colhidos de três árvores de café por repetição. Para calcular a porcentagem de massa seca, amostras de massas conhecidas foram retiradas e submetidas a um processo de secagem em estufa, ajustando a umidade em 12%, nível desejado. Na etapa de determinação da tonelada por hectare, aplicou-se um ajuste de correção considerando a porcentagem de umidade dos grãos frescos. Isso possibilitou a obtenção de uma medida precisa, levando em consideração o teor de umidade como um fator influente nos resultados.

3.3. Determinação de pigmentos em folhas

Em um tubo Eppendorf, foram adicionados 0,25 mg de amostra de folha, seguido pela adição de 8 mL de acetona a 80%, e então a mistura foi homogeneizada. A extração foi realizada no escuro para determinações de teores de clorofila, carotenoides e feofitina, seguida por leituras diretas em um espectrofotômetro na absorbância nos comprimentos de onda de 470, 646,8, 663,8 e 665,4 nm. A concentração dos pigmentos foi estimada de acordo com as equações definidas por Lichtenthaler e Wellburn (1983).

3.4. Determinação da atividade da Rubisco (RUBP carboxilase)

Para a determinação da atividade dessa enzima, 0,3 g do material congelado em nitrogênio líquido foi macerado com 1,5 mL de tampão fosfato de potássio (42 mM KH_2PO_4, 58 mM K_2HPO_4 e 1 mM EDTA). O material macerado foi centrifugado a 14,000 g por 25 minutos a 4 °C (Reid et al. 1997). A atividade total da rubisco foi mensurado em cubeta contendo 100 mM Bicina-NaOH (pH 8.0), 25 mM $KHCO_3$, 20 mM $MgCl_2$, 3.5 mM ATP, 5 mM fosfocreatina, 0.25 mM NADH, 80 nkat gliceraldeido-3-fosfato desidrogenase, 80 nkat 3-fosfoglicérico fosfoquinase e 80 nkat creatina fosfoquinase. 70 µL do sobrenadante foi incubado a 30 °C por 5 minutos na ausência de ribulose-1,5-bisfosfato (RuBP) para carbamilação da enzima. A oxidação do NADP ocorrerreu na cubeta com a adição de 16.66 mM RuBP como descrito por Reid et al. (1997).

3.5. Determinação das espécies reativas de oxigênio

A determinação da concentração de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) foi realizada conforme descrito por Alexieva et al. (2001). A peroxidação lipídica foi estimada com base na concentração de malondialdeído (MDA) de acordo com Heath e Packer (1968).

3.6. Análises do metabolismo antioxidante

Amostras foram maceradas em um almofariz contendo N líquido. Os extratos protéicos foram obtidos a partir de 1,5 g de material vegetal fresco, juntamente com a adição de PVPP (polivinilpolipirrolidona) correspondente a 20% (p:v). A extração de proteínas foi realizada utilizando uma solução tampão de fosfato de potássio a 100 mmol L^{-1} (pH 7,5), EDTA (ácido etilenodiaminotetracético) a 1 mmol L^{-1} e DDT (ditiotreitol) a 1 mmol L^{-1}. Os extratos homogeneizados foram centrifugados a 10.000 g durante 30 min a 4 °C. O sobrenadante foi coletado em tubos Eppendorf e armazenado em freezer a -80 ° C até ser processado para análises de, atividade da superóxido dismutase (SOD), atividade de catalase (CAT) e atividade de ascorbato peroxidase (APX).

Para a determinação da proteína e da atividade da superóxido dismutase (SOD, EC: 1.15.1.1), catalase (CAT, EC: 1.11.1.6) e ascorbato peroxidase (APX, EC: 1.11.1.11), o material foi pesado e preparado de acordo com a metodologia descrita por Gomes-Júnior et al. (2007). A atividade da SOD foi quantificada conforme descrito por Giannopolitis e Ries (1977). A atividade da CAT foi determinada pelo monitoramento da degradação de H_2O_2 conforme descrito por Azevedo et al. (1998). A atividade da APX foi medida conforme descrito por Moldes et al. (2008).

3.7. Análises fisiológicas e bioquímicas

3.7.1. Extração de compostos nitrogenados e fotoassimilados para quantificação e análise

Os compostos nitrogenados e fotoassimilados foram extraídos para as análises através do método descrito por Bieleski e Turner (1966). Para 1,5 g de material fresco, foram acrescentados 10 mL de solução MCW (60% metanol, 25% clorofórmio, 15% H_2O). Após centrifugação, foram acrescentados 1 mL clorofórmio + 1,5 mL H_2O, para cada 4 mL sobrenadante, que foram agitados vigorosamente em vórtex. Aguardou-se a separação de fases e se utilizou-se a fase hidrossolúvel para análise de fotoassimilados (açúcar total e sacarose) e compostos nitrogenados (aminoácidos, amônio e nitrato)

3.7.1.1. Determinação de fotoassimilados

O açúcar total foi determinado de acordo com Dubois et al. (1956). Pipetou-se 5 µL (folhas) e 200 µL (grãos) da fase hidrossolúvel, adicionou-se 500 µL de Fenol 5% e 2000 µL de H_2SO_4. Agitou-se a solução e em espectrofotômetro foi realizado a leitura em 490 nm. As concentrações de açúcar total em folhas e grãos foram baseadas na curva padrão de sacarose, e os resultados são expressos em mg g−1 de peso fresco (folhas) e mg g−1 de peso seco (grãos).

3.7.1.2. Determinação de nitrato

Foi utilizado o método de Cataldo et al. (1975) para quantificar-se as variações da concentração de nitrato presente nas folhas de café. Pipetou-se 5 µL de extrato obtidos da fase aquosa de acordo com o método descrito por Bieleski e Turner e adicionado 40 µL ácido salicílico 5% em H_2SO_4 (p/v). Após 20 minutos em temperatura ambiente, foram acrescentados 1000 µL de NaOH 2N, lentamente. Após resfriar a temperatura ambiente, foram realizadas as leituras em espectrofotômetro em $\lambda = 410$ nm. A concentração de nitrato foi avaliada utilizando-se curva padrão de solução nitrato.

3.7.1.3. Determinação de amônia

Para determinação da concentração de amônia solúvel foi utilizado o método de McCullough (1967). Foi pipetado 25 µL de extrato, da fase hidrossolúvel do MCW, em um tubo de ensaio ao qual foi adicionado 500 µL de solução fenol (2,5 g fenol + 12,5 mg nitroprussiato de sódio em volume final de 250 mL) + 500 µL de solução fosfato (1,25 g NaOH + 13,4 g $Na_2HPO_4.7H_2O$ + 2,5 mL NaOCl 5% em volume final de 250 mL). O ensaio foi incubado por 1 hora a 37 ºC. Em seguida foram efetuadas as leituras em espectrofotômetro em $\lambda = 630$ nm. A concentração de amônio foi avaliada utilizando-se curva padrão de solução sulfato de amônio.

3.7.1.4. Determinação quantitativa de aminoácidos

Para a análise quantitativa de aminoácidos foi usado o método de Yemm e Cocking (1955). Da fase hidrossolúvel do MCW, em volume de 100 μL, foram acrescidos 500 μL tampão citrato e 200 μL solução ninhidrina 5% em éter monometílico de etilenoglicol + 1 mL solução KCN 0,0002 M. O ensaio foi aquecido a 100° C (banho-maria com água fervente) por 20 minutos e, após, resfriado por 10 minutos em água corrente. Foi acrescentado 1 mL de álcool etílico 60%, seguindo-se leitura em espectrofotômetro em $\lambda = 570$ nm. A concentração de aminoácidos solúveis totais. Foi avaliada utilizando-se curva padrão de solução metionina.

3.8. Análise química das folhas do cafeeiro

Amostras de folhas foram identificadas, embaladas em sacos de papel e secas em um forno a aproximadamente 65 °C por 48 horas. Foi realizada a digestão nitro perclórica e a identidade e quantidade dos nutrientes foram determinadas através de visualizações radial em um espectrômetro de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-EOS) equipado com uma câmera de nebulização, conforme detalhado por Reis et al. (2017).

3.9. Análise estatística

Os testes de Anderson-Darling e Levene foram realizados para avaliar a normalidade dos dados e a homoscedasticidade, respectivamente. resultados obtidos foram submetidos à análise de variância (teste F) e, as diferenças significativas entre as médias foram determinadas pelo teste de Tukey a um nível de significância de 5% (Software SigmaPlot 14.0). Para avaliar os efeitos gerais da combinação de K e Mg no cafeeiro, foi realizada uma análise de correlação de Pearson ($p \leq 0,1$) e representada com o Heatmap (Software RStudio).

4. RESULTADOS

Em ambos os anos, observou-se um aumento na produtividade do cafeeiro em todas as doses de MgO, no entanto, as doses de K_2O não tiveram influência nessa variável agronômica (Figura 4). No primeiro ano, sob aplicação de 150 kg ha^{-1} de K_2O; 25 kg ha^{-1} de MgO e 450 kg ha^{-1} de K_2O; 50

kg ha^{-1} de MgO, observou-se um aumento de até 113% na produtividade, em comparação com o controle (Figura 4a). No segundo ano, a aplicação de 25 kg ha^{-1} de MgO aumentou a produtividade em até 50% em relação ao controle (Figura 4b). No entanto, a aplicação de 150 kg ha^{-1} de K_2O e de 50 kg ha^{-1} de MgO, bem como 450 kg ha^{-1} de K_2O e 0 kg ha^{-1} de MgO, resultou em uma diminuição de até 32%.

A aplicação de 150 kg ha^{-1} de K_2O e 25 kg ha^{-1} de MgO resultou em um aumento de 137 sacas de café, enquanto a aplicação de 450 kg ha^{-1} de K_2O e 50 kg ha^{-1} de MgO resultou em um aumento de 105 sacas, em comparação com o controle, no primeiro ano (Figura 4c). No entanto, no segundo ano, observou-se um aumento de 93, 86 e 125 sacas nas combinações de 0, 300 e 450 kg ha^{-1} de K_2O com 25 kg ha^{-1} de MgO, respectivamente, conforme observado na Figura 4d.

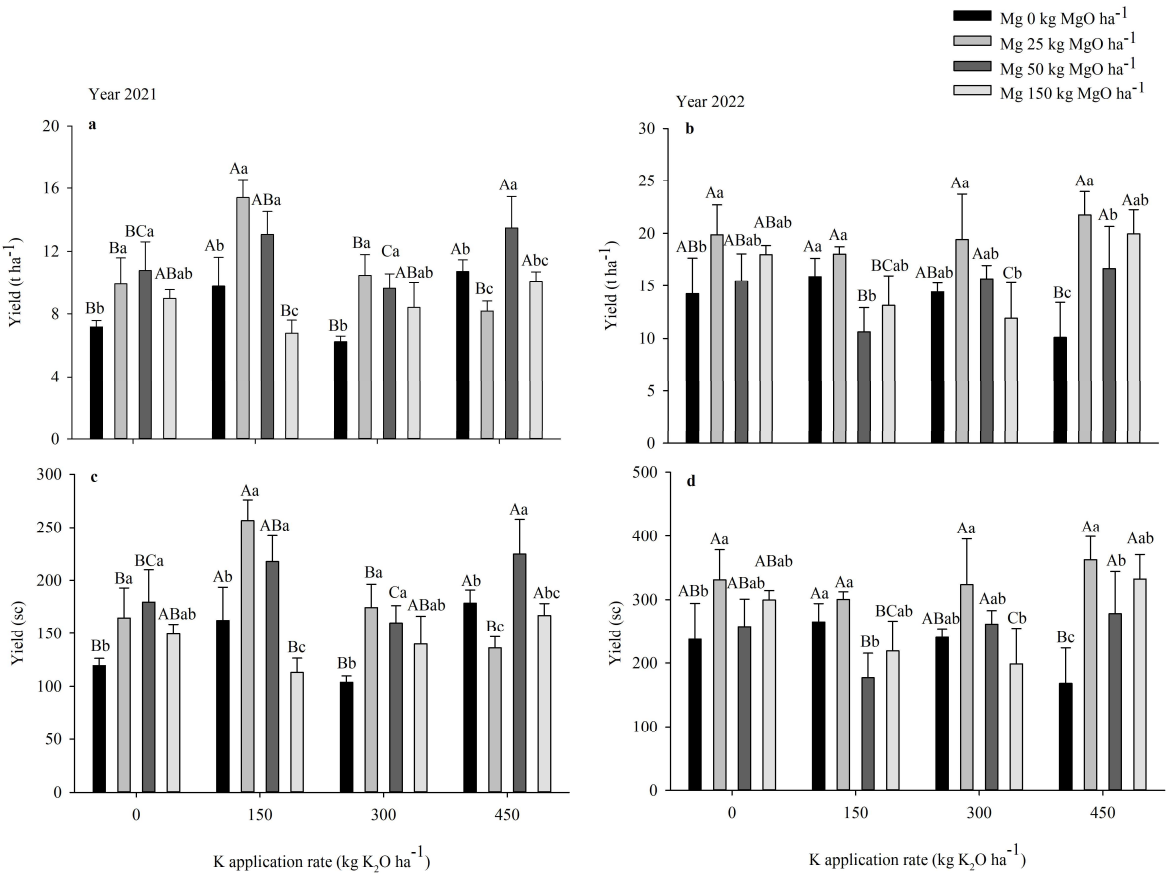


Figura 4. Produtividade no primeiro e no segundo (a-b-c-d) ano do cafeeiro em resposta a combinação de K e Mg. Barra de erro indica o erro padrão da média (n = 4). Letras diferentes indicam diferença entre as médias de acordo com teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Letras maiúsculas correspondem às doses de K, e letras minúsculas correspondem às doses de Mg. CV (%) = (a) 12,76, (b) 16,62, (c) 2,23 e (e) 16,62.

Houve uma interação entre as doses de K_2O e MgO em relação aos pigmentos fotossintéticos em ambos os anos (Figura 5). A aplicação de MgO, sem K_2O ou sob 150 kg ha^{-1} de K_2O, resultou em uma diminuição dos pigmentos fotossintéticos, em ambos os anos. Enquanto que nas combinações de doses mais altas de K_2O e MgO, houve um aumento geral na concentração de pigmentos.

A maior concentração de pigmentos fotossintéticos no primeiro ano (Figura 5-c-e-g) foi observada sob a combinação de 150 kg ha^{-1} de K_2O e 0 kg ha^{-1} de MgO, resultando em um aumento de 57%, 62% e 57% para clorofila total, carotenoides e feofitina total, respectivamente. Da mesma forma, com a combinação de 150 kg ha^{-1} de K_2O e 25 kg ha^{-1} de MgO, houve um aumento de 49%, 57% e 49%, e com a combinação de 150 kg ha^{-1} de K_2O e 150 kg ha^{-1} de MgO, houve um aumento de 49%, 51% e 49%. Além disso, sob a combinação de 450 kg ha^{-1} de K_2O e 50 kg ha^{-1} de MgO, houve um aumento de 56%, 60% e 56%, respectivamente, para clorofila total, carotenoides e feofitina total. No entanto, sob a combinação de 0 kg ha^{-1} de K_2O e 50 kg ha^{-1} de MgO, observou-se uma diminuição dos pigmentos em até 32% em comparação com o controle.

No segundo ano (Figura 5d-f-h), sob a combinação de 150 kg ha^{-1} de K_2O e 25 kg ha^{-1} de MgO, houve aumentos de 91%, 89% e 80% para clorofila total, carotenoides e feofitina total, respectivamente, em comparação com o controle. Da mesma forma, sob a combinação de 450 kg ha^{-1} de K_2O e 150 kg ha^{-1} de MgO, houve aumentos de 77%, 75% e 66%, respectivamente, em comparação com o controle.

Para a atividade da enzima rubisco, foi observada uma interação entre as doses de K_2O e MgO tanto no primeiro quanto no segundo ano (Figura 6). Ao longo dos dois anos de experimento, sob a aplicação de 0 kg ha^{-1} de K_2O e 50 kg ha^{-1} de MgO, houve um aumento de 2,2 e 1,2 vezes, enquanto para a combinação de 150 kg ha^{-1} de K_2O e 50 kg ha^{-1} de MgO, houve um aumento de 1,7 e 1,1 vezes, respectivamente. Da mesma forma, com a aplicação de 450 kg ha^{-1} de K_2O e 50 kg ha^{-1} de MgO, observou-se um aumento de 3,7 e 1,9 vezes na atividade em relação ao controle, no primeiro e segundo ano, respectivamente. No primeiro ano, a menor atividade enzimática foi observada com a aplicação de 0 kg ha^{-1} de K_2O e 150 kg ha^{-1} de MgO, resultando em uma redução de 81% na atividade enzimática. No segundo ano, a atividade da rubisco diminuiu 34% sob a aplicação de 450 kg ha^{-1} de K_2O e 150 kg ha^{-1} de MgO.

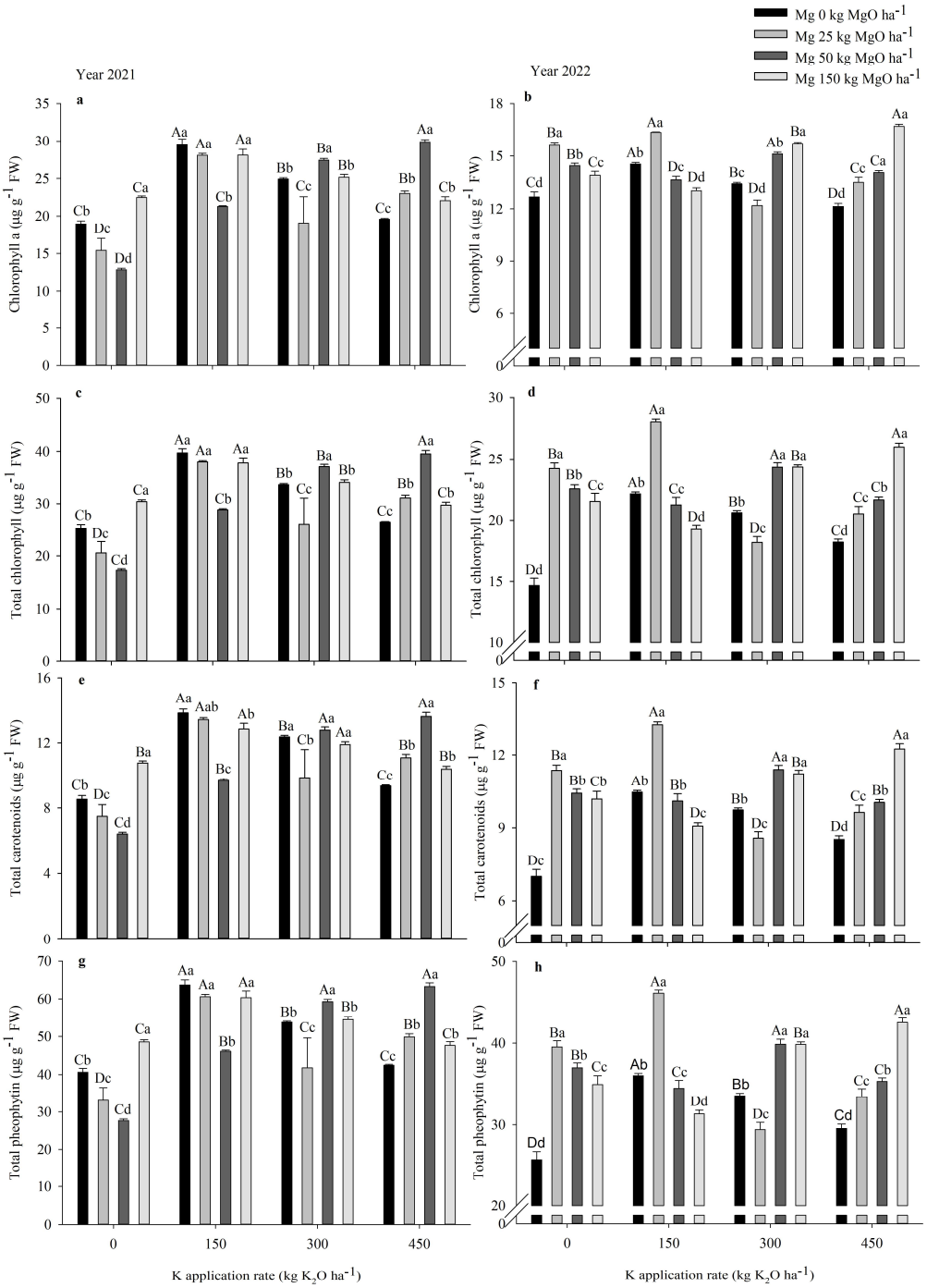


Figura 5. Concentração de clorofila α, clorofila total, carotenoides e feofitina total no primeiro (a-c-e-g) e segundo (b-d-f-h) ano do cafeeiro em resposta a combinação de K e Mg. Barra de erro indica o erro padrão da média (n = 4). Letras diferentes indicam diferença entre as médias de acordo com teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Letras maiúsculas correspondem às doses de K, e letras minúsculas correspondem às doses de Mg. CV (%) = (a) 4,57, (b) 1,29, (c) 4,74, (d) 1,95, (e) 4,68, (f) 2,10, (g) 4,73 e (h) 1,99.

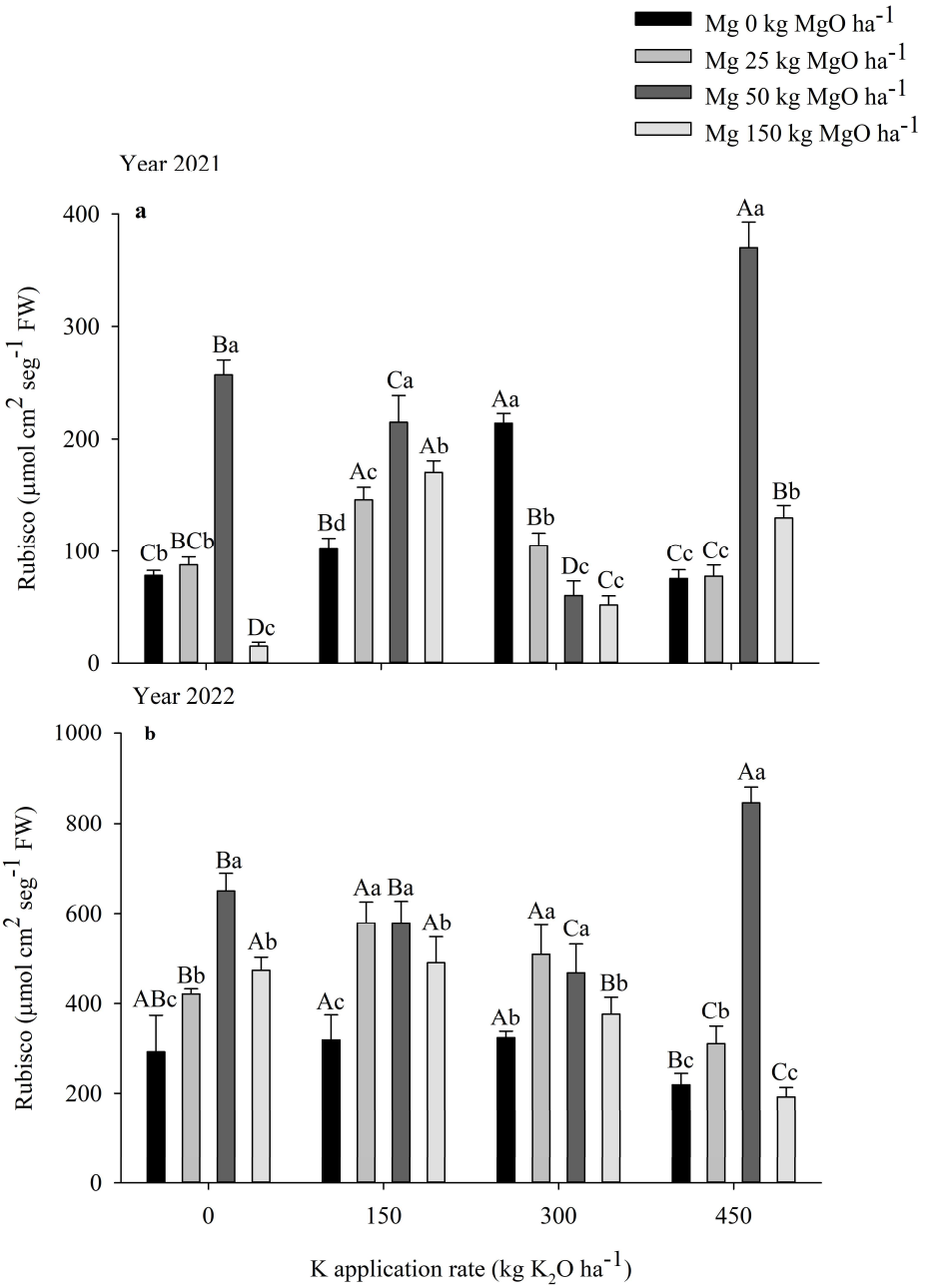


Figura 6. Atividade da enzima rubisco no primeiro (a) e segundo (b) ano do cafeeiro em resposta a combinação de K e Mg. Barra de erro indica o erro padrão da média (n = 4). Letras diferentes indicam diferença entre as médias de acordo com teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Letras maiúsculas correspondem às doses de K, e letras minúsculas correspondem às doses de Mg. CV (%) = (a) 8,78 e (b) 10,34.

Interações entre K e Mg foram observadas para peroxidação lipídica, avaliada como MDA (Malondialdeído), e peróxido de hidrogênio (Figura 7). No primeiro ano, sob 300 kg ha^{-1} de K_2O e

0 kg ha^{-1} de MgO, houve uma redução de 56% da concentração de MDA em relação ao controle (Figura 7a). Já no segundo ano, sob 300 kg ha^{-1} de K_2O e 150 kg ha^{-1} de MgO, houve um aumento de 64% na concentração desse composto nas folhas do cafeeiro. Foram observadas reduções de 38 e 36% na concentração de MDA nas folhas sob 0 kg ha^{-1} de K_2O; 50 kg ha^{-1} de MgO e 150 kg ha^{-1} de K_2O; 25 kg ha^{-1} de MgO, respectivamente (Figura 7b).

Para o segundo ano, a menor concentração de H_2O_2 foi obtida sob 300 kg ha^{-1} de K_2O; 50 kg ha^{-1} de MgO, com uma redução de 62% em relação ao controle (Figura 7c). Além disso, sob 450 kg ha^{-1} de K_2O e 25 kg ha^{-1} de MgO, observou-se uma redução de 38% na concentração de H_2O_2 em relação ao controle (Figura 7d).

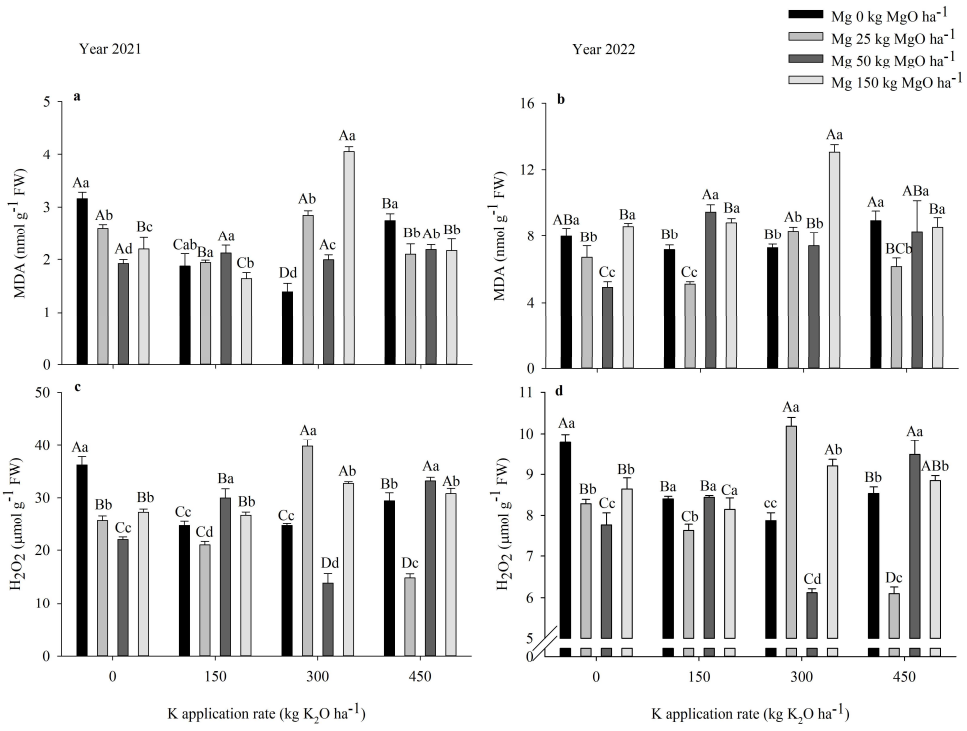


Figura 7. Concentração de peroxidação lipídica (MDA) e peróxido de hidrogênio no primeiro (H_2O_2) (a-c) e segundo (b-d) ano do cafeeiro em resposta a combinação de K e Mg. Barra de erro indica o erro padrão da média (n = 4). Letras diferentes indicam diferença entre as médias de acordo com teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Letras maiúsculas correspondem às doses de K, e letras minúsculas correspondem às doses de Mg. CV (%) = (a) 6,15, (b) 8,30, (c) 4,04 e (d) 2,44.

Para as enzimas do sistema antioxidante do cafeeiro, observou-se interação entre as doses de K e Mg tanto no primeiro quanto no segundo ano. No primeiro ano, a menor atividade da enzima SOD, 65% menor que o controle, foi observado sob 0 kg ha^{-1} de K_2O; 25 kg ha^{-1} de MgO (Figura

8a). No segundo ano, as menores atividade da SOD, 62% inferior ao controle, foram observadas sob 300 kg ha^{-1} de K_2O; 0 kg ha^{-1} de MgO e 300 kg ha^{-1} de K_2O; 50 kg ha^{-1} de MgO (Figura 8b).

Em relação à APX no primeiro ano, as maiores atividades foram observadas sob 0 kg ha^{-1} de K_2O; 25 kg ha^{-1} de MgO e 150 kg ha^{-1} de K_2O; 50 kg ha^{-1} de MgO, com aumento de 29 e 51% em relação a testemunha, respectivamente. Já sob a aplicação de 300 kg ha^{-1} de K_2O; 150 kg ha^{-1} de MgO, foi observada uma redução de 63% na atividade desta enzima (Figura 8c). No segundo ano, a atividade da APX sob 300 kg ha^{-1} de K_2O; 0 kg ha^{-1} de MgO apresentou uma redução de 72% em relação ao controle (Figura 8d).

Para a enzima CAT no primeiro ano, as maiores atividades foram observadas sob a aplicação de 150 kg ha^{-1} de K_2O combinadas com 0, 25 e 50 kg ha^{-1} de MgO, com aumento de 320, 320 e 474%, respectivamente, em relação à testemunha. A menor atividade foi observada no controle (Figura 8e). No segundo ano, as maiores atividades da CAT foram observadas sob 150 kg ha^{-1} de K_2O; 25 kg ha^{-1} de MgO e 150 kg ha^{-1} de K_2O; 50 kg ha^{-1} de MgO, com aumento de 161 e 154%, respectivamente, em relação à testemunha, e a menor sob 300 kg ha^{-1} de K_2O; 0 kg ha^{-1} de MgO, com 19% a menos que o controle (Figura 8f).

A concentração de proteína total nas folhas do cafeeiro foi afetada pela aplicação de K e Mg nos dois anos. Sob 0 kg ha^{-1} de K_2O; 25 kg ha^{-1} de MgO, 450 kg ha^{-1} de K_2O; 0 kg ha^{-1} de MgO, houve um incremento de 182%, no primeiro ano, em relação ao tratamento controle (Figura 8g). No segundo ano, observou-se que as aplicações de 150 kg ha^{-1} de K_2O; 50 kg ha^{-1} de MgO, 300 kg ha^{-1} de K_2O; 0 kg ha^{-1} de MgO e 300 kg ha^{-1} de K_2O; 50 kg ha^{-1} de MgO reduziu em 84, 161 e 154%, respectivamente, a concentração de proteína total, em relação ao controle, no tecido foliar do cafeeiro (Figura 8h).

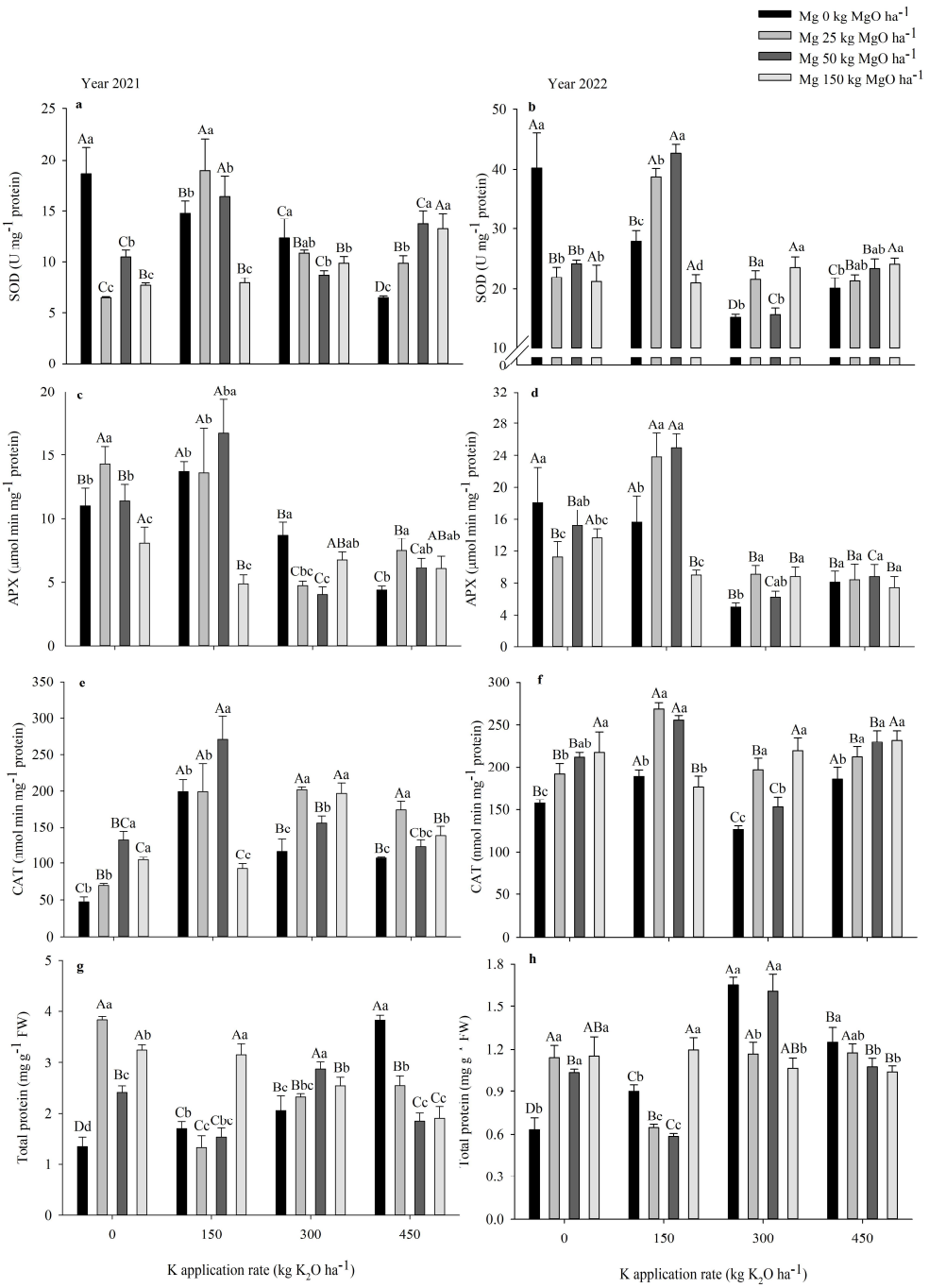


Figura 8. Atividade da enzima superóxido dismutase (SOD), ascorbato peroxidase (APX), catalase (CAT) e proteína total no primeiro (a-c-e-g) e segundo (b-d-f-h) ano do cafeeiro em resposta a combinação de K e Mg. Barra de erro indica o erro padrão da média (n = 4). Letras diferentes indicam diferença entre as médias de acordo com teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Letras maiúsculas correspondem às doses de K, e letras minúsculas correspondem às doses de Mg. CV (%) = (a) 10,98, (b) 8,30, (c) 15,88, (d) 16,60, (e) 10,37, (f) 6,23, (g) 6,91 (h) 7,22.

Em ambos os anos, foram observadas interações entre as doses de K_2O e MgO para a concentração de açúcar total em folhas e grãos (Figura 5). Em relação ao açúcar total nos grãos, sob a combinação de 0 kg ha^{-1} de K_2O e 50 kg ha^{-1} de MgO, houve um aumento de 23%, e a combinação de 300 kg ha^{-1} de K_2O e 150 kg ha^{-1} de MgO resultou em uma diminuição de 44% no primeiro ano. Em relação ao segundo ano (Figura 5d), as doses de 300 kg ha^{-1} de K_2O e 0 kg ha^{-1} de MgO diminuíram em 62%.

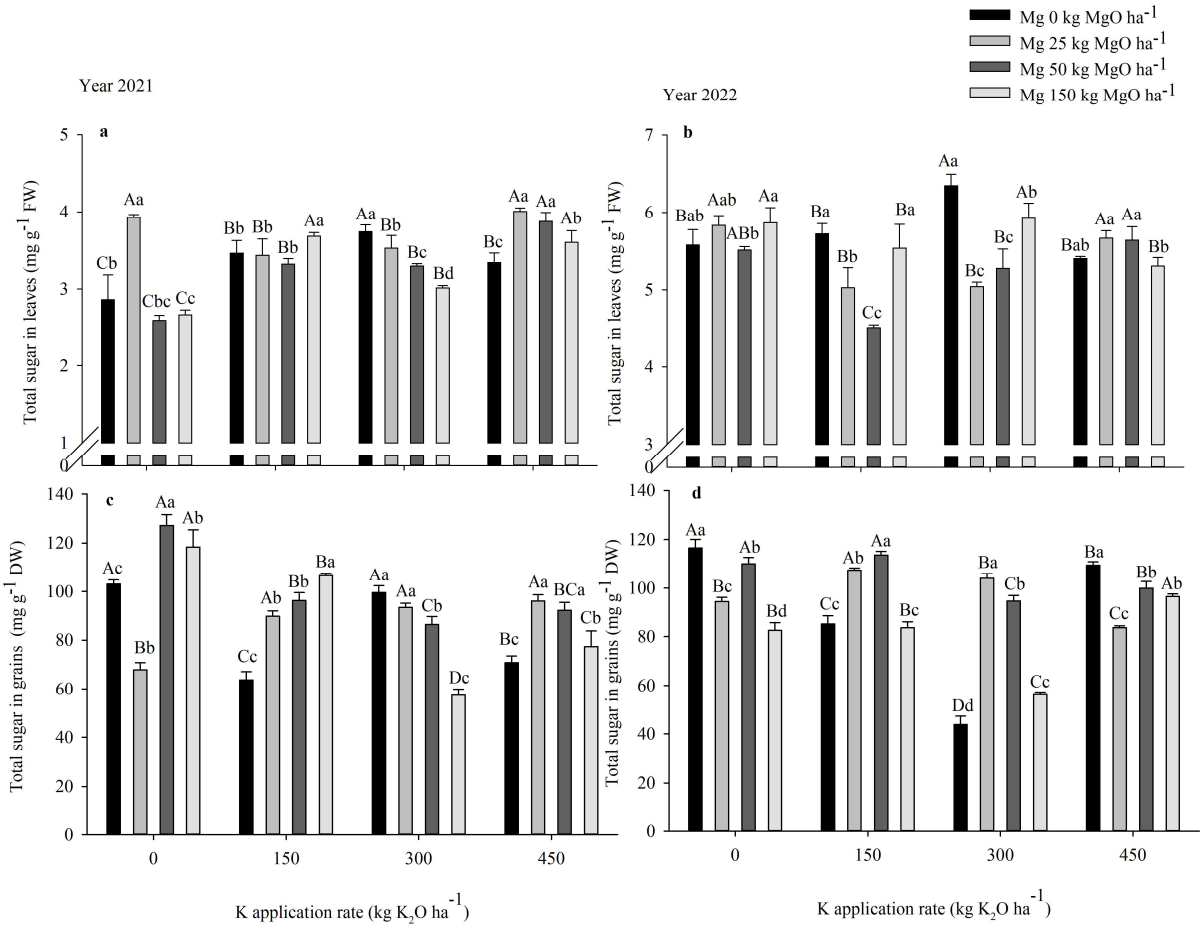


Figura 9. Concentração de açúcar total em folhas e grãos (a-c) e segundo (b-d) ano do cafeeiro em resposta a combinação de K e Mg. Barra de erro indica o erro padrão da média (n = 4). Letras diferentes indicam diferença entre as médias de acordo com teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Letras maiúsculas correspondem às doses de K, e letras minúsculas correspondem às doses de Mg. CV (%) = (a) 3,12, (b) 3,08, (c) 3,80 e (d) 2,47.

A maior concentração de nitrato no primeiro ano (Figura 10a) foi observada sob 150 kg ha^{-1} de K_2O e 25 kg ha^{-1} de MgO, 9% maior que o controle, com resultados estatisticamente semelhantes observados sob 300 kg ha^{-1} de K_2O; 150 kg ha^{-1} de MgO e 450 kg ha^{-1} de K_2O; 0 kg ha^{-1} de MgO.

A menor concentração de nitrato no primeiro ano, 8% menor que a testemunha, foi observada 0 kg ha^{-1} de K_2O e 150 kg ha^{-1} de MgO. No segundo ano, a concentração de nitrato foi maior sob 150 kg ha^{-1} de K_2O; 25 kg ha^{-1} MgO, 450 kg ha^{-1} de K_2O; 0 e 50 kg ha^{-1} MgO em 62, 80 e 59%, respectivamente, maior que o controle, e foi menor (25% menor que o controle) sob 0 kg ha^{-1} de K_2O; 150 kg ha^{-1} MgO (Figura 10b).

A maior concentração de amônia no primeiro ano foi observada sob 300 kg ha^{-1} de K_2O; 25 e 50 kg ha^{-1} MgO, 23% maior que o controle. E a menor concentração foi obtida sob 300 kg ha^{-1} de K_2O; 150 kg ha^{-1} MgO, sendo 16% menor que o controle (Figura 10c). A concentração de amônia no segundo ano foi menor (30% menor que o controle) sob 150 kg ha^{-1} de K_2O; 0 kg ha^{-1} MgO e 150 kg ha^{-1} de K_2O; 50 kg ha^{-1} MgO (Figura 9d).

Para aminoácidos livres no primeiro ano, as maiores concentração foram observadas nos tratamentos que não receberam K (0 kg ha^{-1}). A aplicação de doses combinadas de K com Mg resultou na redução desse composto nas folhas do cafeeiro. A menor concentração de aminoácidos foi obtida sob 450 kg ha^{-1} de K_2O; 25 kg ha^{-1} de MgO, sendo 71% menor que o controle (Figura 10e). No segundo ano, a menor concentração de aminoácidos livres foi observada sob 150 kg ha^{-1} de K_2O; 50 kg ha^{-1} de MgO e 450 kg ha^{-1} de K_2O; 150 kg ha^{-1} de MgO, 55 e 48%, respectivamente, menor que o controle.

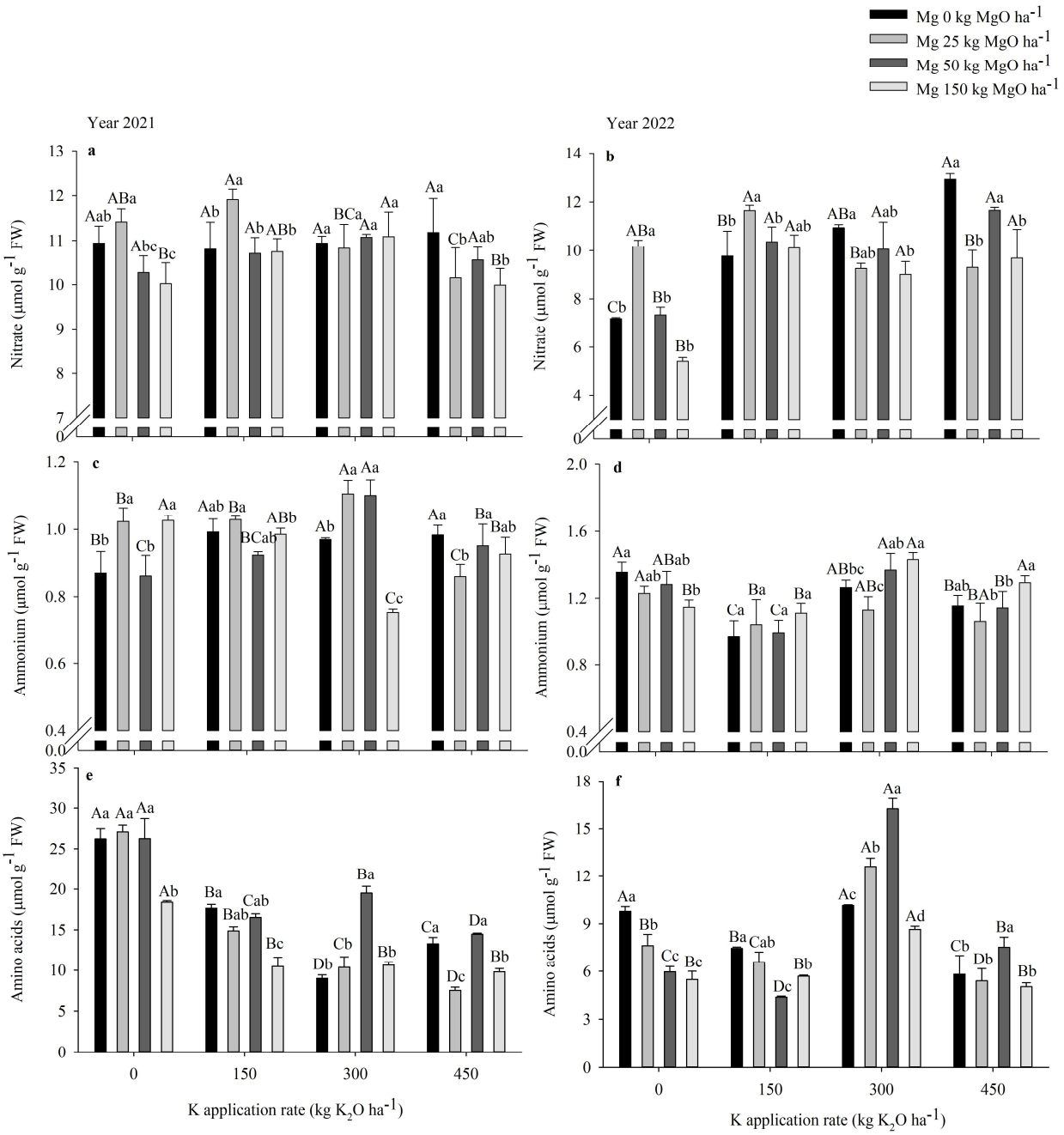


Figura 10. Concentração de nitrato, amônia e aminoácidos no primeiro (a-c-e) e segundo (b-d-f) ano do cafeeiro em resposta a combinação de K e Mg. Barra de erro indica o erro padrão da média (n = 4). Letras diferentes indicam diferença entre as médias de acordo com teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Letras maiúsculas correspondem às doses de K, e letras minúsculas correspondem às doses de Mg. CV (%) = (a) 4,07, (b) 10,17, (c) 3,99, (d) 6,53, (e) 6,02 e (f) 6,80.

Houve interação entre os elementos K e Mg para as concentrações de macronutrientes em folhas do cafeeiro (Tabela 3).

No primeiro ano, os tratamentos com as maiores concentrações de N em folhas foram aqueles que receberam 0 kg ha^{-1} de K_2O; 25 kg ha^{-1} de MgO, 150 kg ha^{-1} de K_2O; 25 kg ha^{-1} de MgO, 300 kg ha^{-1} de K_2O; 0 e 150 kg ha^{-1} de MgO e 450 kg ha^{-1} de K_2O; 50 kg ha^{-1} de MgO. No entanto, para o segundo ano, a concentração de N reduziu em 16% em relação ao controle sob aplicação 300 kg ha^{-1} de K_2O; 25 kg ha^{-1} de MgO.

Com base na análise estatística realizada, não foi encontrada evidência de diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos em relação ao P. Isso indica que a aplicação de diferentes doses de K e Mg não teve efeito estatisticamente significativo na concentração de P nas folhas do cafeeiro.

Para o K, os tratamentos 0 kg ha^{-1} de K_2O; 25 e 150 kg ha^{-1} de MgO, resultaram em uma redução de 17% na concentração desse nutriente em relação ao controle, no primeiro ano. No segundo ano, houve redução de 9% na concentração de K, sob o tratamento com 450 kg ha^{-1} de K_2O; 50 kg ha^{-1} MgO, em relação ao controle.

As concentrações de Ca nas folhas foram influenciadas pelas doses de K e Mg, tanto no primeiro quanto no segundo ano. No primeiro ano, as aplicações de 0 kg ha^{-1} de K_2O; 50 kg ha^{-1} MgO, 300 kg ha^{-1} de K_2O; 150 kg ha^{-1} MgO e 450 kg ha^{-1} de K_2O; 50 e 150 kg $ha^{-1,}$ MgO reduziram em até 26% em comparação com o controle. As doses de 150 kg ha^{-1} de K_2O; 0 e 150 kg ha^{-1} MgO, 300 kg ha^{-1} de K_2O; 25 e 50 kg ha^{-1} MgO, aumentaram a concentração de Ca em até 18%, e houve redução de 10%, sob 450 kg ha^{-1} de K_2O; 450 kg ha^{-1} MgO, em relação ao tratamento controle.

Houve antagonismo entre o K e Mg. Como pode ser observado, nos tratamentos que receberam doses elevadas de K e não receberam Mg: 0, 150, 300 e 450 kg ha^{-1} de K_2O, houve uma redução de até 20% do teor de Mg nas folhas do cafeeiro. O mesmo comportamento ocorreu no segundo ano experimental, no qual houve uma redução de até 14% no teor de Mg em relação ao controle.

Combinação de K e Mg teve interação com as concentrações dos micronutrientes como pode ser observado na Tabela 4. Em relação ao primeiro ano, doses de 450 kg ha^{-1} de K_2O; 450 kg ha^{-1} MgO, proporcionou o aumento da concentração de Cu e Zn em 52 e 89%, respectivamente, em relação ao controle. O menor teor de Fe, 20% a menos, foi obtido sob aplicação de sob 0 kg ha^{-1} de K_2O; 50 kg ha^{-1} MgO, e sob sob 150 kg ha^{-1} de K_2O; 150 kg ha^{-1} MgO e sob 450 kg ha^{-1} de K_2O; 25 kg ha^{-1} MgO uma redução de 33 e 45%, em relação ao controle, para o teor de Mn.

Conforme mostrado no Heatmap (Figura 11), a interação entre as combinações de K e Mg está associado com o aumento da produtividade, com os pigmentos fotossintéticos, com a atividade da enzima rubisco, das enzimas antioxidantes e a concentração dos compostos de nitrogênio.

Tabela 3. Efeito da combinação de K e Mg na concentração de macronutrientes em folhas do cafeeiro.

Macronutients	Doses	Year 2021				Year 2022			
		Mg (kg ha^{-1})				Mg (kg ha^{-1})			
(g ha^{-1})	K (kg ha^{-1})	0	25	50	150	0	25	50	150
N	0	31.33 ± 0.68 Ba	30.63 ± 0.36 Aa	30.60 ± 0.69 Aba	32.17 ± 0.23 Aba	30.33 ± 0.36 Aa	29.13 ± 0.60 Aa	27.33 ± 0.38 Aa	30.30 ± 0.18 ABa
	150	29.93 ± 0.59 Bab	31.77 ± 0.79 Aa	29.27 ± 0.19 Bb	30.93 ± 0.32 Bab	29.63 ± 0.32 Aa	28.33 ± 0.52 ABa	27.70 ± 0.85 Aa	29.27 ± 0.58 Ba
	300	34.43 ± 0.45 Aa	31.17 ± 0.69 Ab	30.43 ± 0.50 Abb	34.20 ± 0.82 Aa	27.83 ± 0.51 Aab	25.40 ± 0.24 Bb	29.16 ± 0.19 Aa	27.97 ± 0.85 Bab
	450	30.70 ± 0.41 Ba	31.77 ± 0.83 Aa	32.60 ± 0.49 Aa	31.40 ± 0.32 Ba	27.67 ± 1.48 Ab	28.60 ± 0.48 ABb	29.67 ± 1.11 Aab	32.97 ± 2.16 Aa
		CV (%) = 3.18				CV (%) = 6.07			
P	0	1.00 ± 0.01 *	1.00 ± 0.01 *	0.97 ± 0.03 *	0.93 ± 0.03 *	1.37 ± 0.06 *	1.47 ± 0.02 *	1.47 ± 0.02 *	1.27 ± 0.05 *
	150	0.97 ± 0.01 *	1.00 ± 0.01 *	1.00 ± 0.07 *	1.07 ± 0.10 *	1.23 ± 0.02 *	1.33 ± 0.02 *	1.33 ± 0.07 *	1.23 ± 0.02 *
	300	1.10 ± 0.01 *	1.10 ± 0.06 *	1.13 ± 0.01 *	1.20 ± 0.01 *	1.13 ± 0.04 *	1.23 ± 0.05 *	1.33 ± 0.04 *	1.23 ± 0.02 *
	450	1.20 ± 0.01 *	1.20 ± 0.01 *	1.07 ± 0.07 *	1.13 ± 0.07 *	1.17 ± 0.07 *	1.23 ± 0.02 *	1.23 ± 0.03 *	1.23 ± 0.03 *
		CV (%) = 7.39				CV (%) = 5.52			
K	0	20.90 ± 0.38 Aa	17.70 ± 0.21 Cb	18.10 ± 0.19 Bb	17.87 ± 0.44 Cb	17.73 ± 0.46 Aa	18.87 ± 0.81 Aa	19.17 ± 0.08 Aa	19.03 ± 0.42 ABa
	150	20.00 ± 0.90 Aa	19.10 ± 0.36 Bca	21.00 ± 0.77 Aa	20.23 ± 0.40 Aba	17.60 ± 0.22 Ab	18.37 ± 0.63 Aab	18.77 ± 0.18 Aab	19.90 ± 0.29 ABa
	300	18.73 ± 0.33 Ab	21.50 ± 0.36 Aa	19.57 ± 0.44 Abab	20.90 ± 0.19 Aab	18.07 ± 0.18 Ab	17.90 ± 0.62 Ab	19.17 ± 0.98 Aab	20.50 ± 0.51 Aa
	450	20.50 ± 1.18 Aa	20.80 ± 0.68 Aba	19.90 ± 0.36 Abab	18.13 ± 0.72 BCb	19.47 ± 0.39 Aa	18.43 ± 0.56 Aa	16.20 ± 0.27 Bb	18.13 ± 0.13 Ba
		CV (%) = 5.12				CV (%) = 5.43			
Ca	0	11.43 ± 0.08 Aa	10.80 ± 0.18 Aab	9.77 ± 0.12 Bc	10.23 ± 0.39 Bbc	9.70 ± 0.14 Bb	9.73 ± 0.45 Aab	8.07 ± 0.02 Bc	10.83 ± 0.46 ABa
	150	10.37 ± 0.05 Bb	10.60 ± 0.20 Aab	11.13 ± 0.29 Aab	11.60 ± 0.17 Aa	10.97 ± 0.25 Aa	9.73 ± 0.37 Ab	9.83 ± 0.12 Ab	11.40 ± 0.39 Aa
	300	10.83 ± 0.13 Aba	10.73 ± 0.15 Aa	10.47 ± 0.22 Abab	9.60 ± 0.26 Bb	10.50 ± 0.24 ABa	10.10 ± 0.29 Aa	9.80 ± 0.24 Aa	9.83 ± 0.36 Ba
	450	10.27 ± 0.61 Ba	8.20 ± 0.39 Bb	9.77 ± 0.01 Ba	8.47 ± 0.11 Cb	9.90 ± 0.30 ABab	9.53 ± 0.31 Abc	10.80 ± 0.07 Aa	8.70 ± 0.05 Cc
		CV (%) = 4.46				CV (%) = 5.95			
Mg	0	5.60 ± 0.03 Aa	4.73 ± 0.12 Ab	4.47 ± 0.05 Ab	5.27 ± 0.16 Aa	5.73 ± 0.20 Aa	4.57 ± 0.10 Bb	4.33 ± 0.04 Bb	4.57 ± 0.06 Bb
	150	4.67 ± 0.06 Ba	4.73 ± 0.13 Aa	4.90 ± 0.03 Aa	4.93 ± 0.12 Aa	4.93 ± 0.04 Cb	5.63 ± 0.11 Aa	4.83 ± 0.08 Ab	5.67 ± 0.08 Aa
	300	4.87 ± 0.10 Ba	4.7 ± 0.05 Aab	4.80 ± 0.11 Aa	4.27 ± 0.21 Bb	5.43 ± 0.12 ABab	5.20 ± 0.19 Ab	5.13 ± 0.15 Ab	5.90 ± 0.22 Aa
	450	4.50 ± 0.15 Ba	3.77 ± 0.13 Bb	4.70 ± 0.08 Aa	4.47 ± 0.07 Ba	5.07 ± 0.07 BCa	3.47 ± 0.05 Cb	3.57 ± 0.16 Cb	3.30 ± 0.16 Cb
		CV (%) = 4.18				CV (%) = 5.44			
S	0	1.73 ± 0.09 Ac	2.17 ± 0.21 Aab	1.87 ± 0.02 Abc	2.23 ± 0.12 Aa	1.83 ± 0.07 Ba	1.60 ± 0.07 ABa	1.87 ± 0.16 ABa	1.93 ± 0.15 Aa
	150	2.03 ± 0.02 Aa	1.93 ± 0.02 Aba	1.80 ± 0.04 Aa	1.93 ± 0.04 Aa	1.73 ± 0.03 Ba	1.43 ± 0.01 Bab	1.93 ± 0.04 Aba	1.83 ± 0.11 Aa
	300	1.83 ± 0.08 Aa	1.77 ± 0.05 Ba	1.83 ± 0.04 Aa	1.93 ± 0.13 Aa	2.27 ± 0.15 Aa	1.90 ± 0.04 Aab	1.67 ± 0.14 Bbc	1.50 ± 0.12 Bc
	450	1.73 ± 0.04 Aa	1.70 ± 0.12 Ba	1.90 ± 0.11 Aa	2.03 ± 0.06 Aa	1.97 ± 0.14 ABa	1.83 ± 0.05 Aab	2.10 ± 0.14 Aa	1.47 ± 0.06 Bb
		CV (%) = 8.54				CV (%) = 11.25			

Tabela 4. Efeito da combinação de K e Mg na concentração de micronutrientes em folhas do cafeeiro.

Micronutients	Doses	Year 2021				Year 2022			
		Mg (kg ha^{-1})				Mg (kg ha^{-1})			
(mg ha^{-1})	K (kg ha^{-1})	0	25	50	150	0	25	50	150
Cu	0	148.00 ± 1.44 Dc	200.00 ± 3.08 Ba	177.00 ± 1.64 Bb	195.67 ± 3.63 Ba	149.67 ± 1.03 Bb	157.33 ± 5.23 Bb	157.67 ± 8.57 Ab	223.33 ± 5.04 Aa
	150	192.00 ± 2.74 Aa	199.00 ± 1.09 Ba	176.33 ± 2.16 Bb	191.33 ± 2.21 Bca	156.33 ± 11.90 Bb	189.00 ± 9.96 Aa	176.00 ± 9.87 Aab	171.00 ± 3.26 Bab
	300	177.67 ± 2.69 Bab	172.00 ± 2.57 Cb	184.33 ± 1.95 Ba	182.33 ± 2.29 Ca	189.67 ± 4.75 Aa	187.67 ± 7.20 ABa	183.00 ± 6.01 Aa	136.00 ± 3.37 Cb
	450	159.67 ± 1.00 Cb	227.33 ± 1.72 Aa	223.33 ± 2.16 Aa	225.33 ± 3.31 Aa	180.00 ± 13.28 ABa	164.67 ± 5.73 ABa	183.67 ± 10.89 Aa	157.33 ± 6.72 BCa
		CV (%) = 2.22				CV (%) = 9.32			
Fe	0	75.00 ± 1.52 Aa	67.67 ± 0.58 Abb	60.00 ± 0.80 Cc	64.00 ± 0.90 Abc	74.33 ± 1.10 Bb	85.33 ± 0.95 Aa	80.33 ± 4.10 Bab	83.33 ± 1.34 Aab
	150	66.00 ± 1.18 B ab	68.67 ± 1.16 Aba	63.33 ± 1.96 BCb	63.33 ± 1.83 Ab	71.67 ± 2.99 Ba	73.33 ± 2.64 Ba	64.67 ± 1.33 Ca	67.33 ± 2.02 Ba
	300	65.00 ± 0.63 Bab	64.33 ± 1.26 Bb	69.00 ± 0.38 Aa	61.33 ± 1.12 Ab	81.00 ± 2.12 ABa	87.33 ± 3.26 Aa	70.33 ± 3.50 Cb	66.33 ± 2.41 Bb
	450	74.67 ± 1.08 Aa	70.33 ± 1.26 Aa	65.00 ± 0.63 ABb	64.33 ± 0.30 Ab	87.33 ± 3.70 Ab	90.67 ± 2.18 Aab	98.67 ± 1.29 Aa	82.67 ± 2.03 Ab
		CV (%) = 3.06				CV (%) = 6.53			
Mn	0	108.67 ± 3.76 Aa	80.00 ± 2.31 Bb	112.67 ± 2.01 Aa	88.33 ± 2.58 Bb	67.00 ± 1.58 Ba	75.67 ± 2.15 Aa	77.67 ± 5.59 Ba	76.67 ± 2.11 Ba
	150	98.00 ± 1.51 Bb	109.33 ± 3.86 Aa	98.00 ± 2.07 Cb	72.33 ± 0.66 Cc	60.00 ± 2.06 Ba	60.00 ± 2.90 Ba	59.00 ± 1.38 Ca	42.00 ± 1.04 Cb
	300	100.33 ± 1.19 Abc	88.67 ± 0.68 Bd	111.67 ± 1.85 Abb	141.33 ± 5.06 Aa	81.00 ± 0.49 Ab	69.67 ± 2.46 ABb	83.33 ± 4.93 ABa	91.33 ± 6.32 Aa
	450	79.00 ± 0.59 Cb	59.67 ± 1.88 Cc	102.67 ± 2.95 Bca	88.67 ± 2.35 Bb	90.00 ± 3.84 Aa	65.00 ± 0.72 ABb	93.33 ± 1.91 Aa	82.67 ± 4.09 ABa
		CV (%) = 4.67				CV = 9.03			
Zn	0	18.33 ± 1.02 Cc	30.67 ± 0.85 Aa	25.67 ± 0.20 Bb	26.67 ± 0.54 Bb	40.33 ± 0.92 Cb	45.67 ± 0.55 Ab	46.00 ± 0.84 Bb	58.00 ± 2.93 Aa
	150	29.67 ± 0.68 Ab	28.00 ± 0.73 Ab	29.67 ± 0.82 Ab	33.67 ± 0.82 Aa	55.00 ± 3.86 ABa	51.00 ± 2.21 Aa	48.33 ± 5.65 Ba	50.67 ± 5.62 ABa
	300	30.67 ± 0.85 Aa	29.67 ± 0.54 Aa	31.33 ± 0.51 Aa	29.67 ± 1.66 Ba	62.00 ± 1.81 Aab	51.33 ± 1.20 Ab	68.33 ± 2.38 Aa	38.33 ± 2.34 Cc
	450	25.33 ± 0.42 Bc	31.00 ± 1.33 Ab	32.00 ± 0.81 Aab	34.67 ± 0.54 Aa	49.33 ± 2.54 BCa	42.00 ± 2.50 Aa	51.33 ± 0.17 Ba	43.67 ± 2.14 BCa
		CV (%) = 5.17				CV (%) = 11.68			

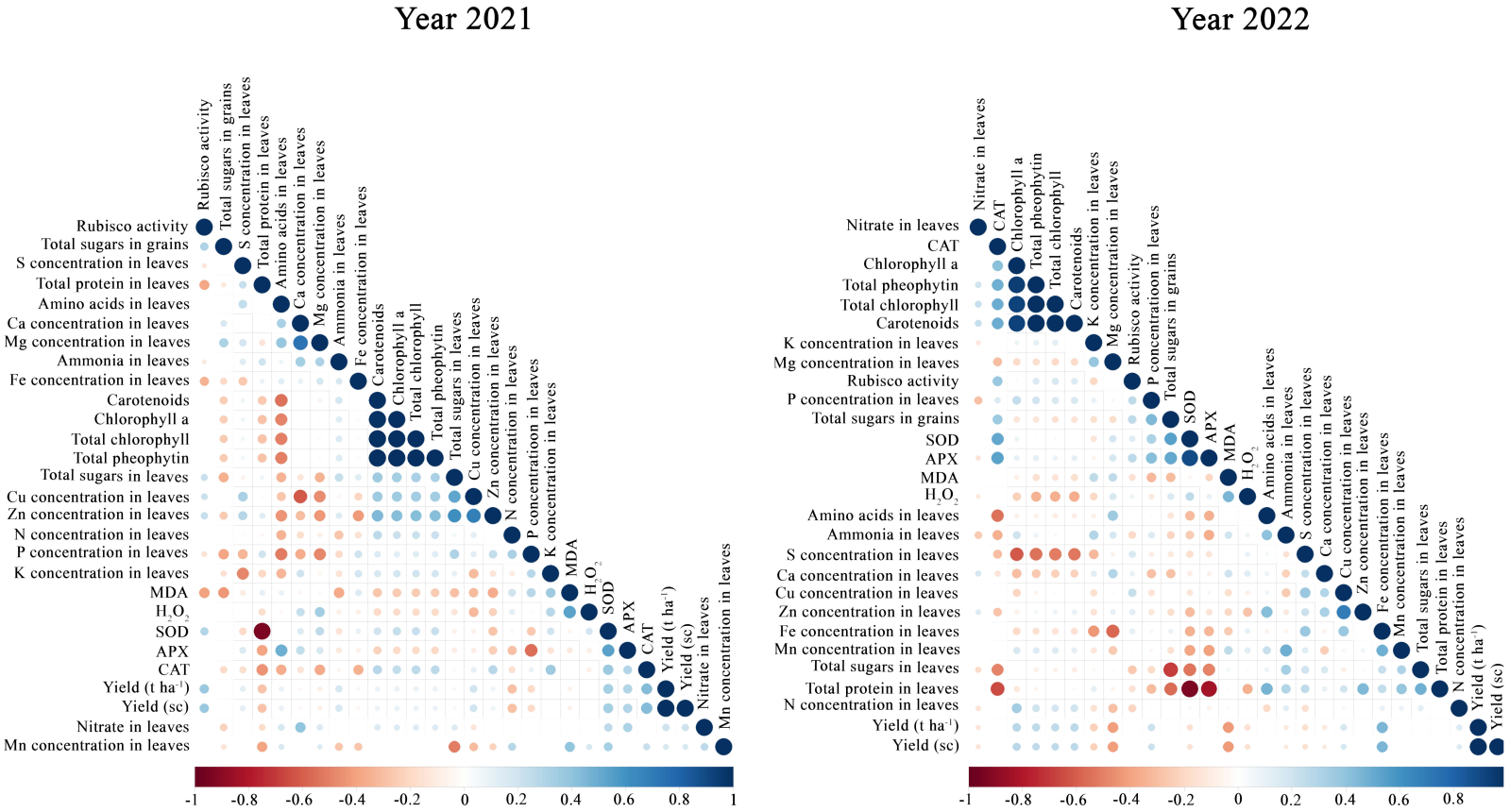


Figura 11. Os *Heatmap* indicam as correlações de Pearson ($p < 0.01$) entre os parâmetros fisiológicos e bioquímicos avaliados em respostas às doses de K e Mg aplicadas às plantas de café.

5. DISCUSSÃO

Como supracitado, sob condições climáticas adversas aliadas a fatores antrópicos, a ocorrência de carência de Mg no tecido vegetal, oriunda da competição pelo K, é comum. A grande maioria dos produtos vegetais comercializados são órgãos dreno, durante o ciclo (grãos, frutas, tubérculos, rizomas etc.), por isso, a formação e desenvolvimento destes órgãos está diretamente relacionada com a translocação de fotoassimilados. Este processo envolve outros nutrientes como fósforo e boro, mas o papel do Mg é bastante relatado (Tranknet et al., 2018) portanto quando os teores de K e Mg estão desbalanceados, a produtividade é afetada, já que ambos competem por reações neste processo.

O efeito do Mg em aumentar a produtividade foi previamente relatado no milho por (Ertiftik et al., 2017). No presente estudo, foi observado que a suplementação adequada de 150 kg K_2O ha^{-1} e 25 kg MgO ha^{-1} às plantas de café pode resultou em um aumento de 91% na produtividade (Figura 4).

Os pigmentos fotossintéticos, como: carotenóides, clorofilas e feofitinas são pigmentos importantes para evitar a produção excessiva de EROs, pois desempenham um papel na eficiência fotossintética e contribuem para a proteção e dissipação do excesso de energia solar (Mendes et al., 2023; Cunha et al., 2022; Silva et al., 2020). Esses pigmentos podem ajudar a aumentar a tolerância das plantas a estresses ambientais (Agathokleous et al., 2020; Agathokleous, 2021).

A deficiência de K inibe a execução de processos enzimático-fotoquímicos, resultando na redução dos níveis de clorofila e em modificações na atividade da enzima Rubisco. Isso leva a um detrimento na eficiência da fotossíntese e a uma diminuição nos mecanismos de proteção contra a luz excessiva (Erel et al., 2015). Além disso, o Mg desempenha um papel importante no processo fotossintético, uma vez que cerca de 15 a 35% do Mg total nas plantas está associado aos cloroplastos, principalmente como componente da clorofila, um constituinte fundamental no processo de transferência de elétrons (Chen et al., 2018; Cakmak & Yazici, 2010; Von Wettstein, 1991).

Portanto, a combinação de K e Mg é essencial para otimizar os processos fotossintéticos e, consequentemente, aumentar a produção de açúcar e a produtividade das plantas. É importante garantir que as plantas recebam esses nutrientes em quantidades adequadas por meio da fertilização adequada e do manejo do solo.

Sob a aplicação de K e Mg em plantas de café, observou-se um aumento na concentração de pigmentos fotossintéticos (Figura 5). Em ambos os anos do estudo, as plantas pertencentes ao tratamento controle que não receberam suplementação de K e Mg apresentaram concentrações mais baixas de clorofila total, carotenoides e feofitina total. Isso sugere que tanto o K quanto o Mg desempenham um papel crucial na biossíntese dos pigmentos fotossintéticos. A dose que proporcionou um aumento médio de 52% no primeiro ano e 67% no segundo ano para esses pigmentos foi a combinação de 150 kg ha^{-1} de K_2O e 25 kg ha^{-1} de MgO.

Além da síntese de clorofila, K e Mg são cruciais para a ativação de enzimas e a estabilidade da membrana nas plantas (Xie et al., 2021). O Mg é um elemento mineral responsável pela ativação de mais de 300 enzimas, incluindo ATPase e rubisco. No caso do rubisco, sua ativação requer a ligação com um íon de Mg (Bhat et al., 2017). Essa enzima desempenha um papel na catalisação da reação fotossintética primária da fixação de CO_2 da atmosfera no ribulose-1,5-bifosfato (RuBP), formando duas moléculas de 3-fosfoglicerato (3PGA), que são posteriormente usadas para formar moléculas de açúcar (Chen et al., 2018).

Neste experimento, a aplicação de 450 kg de K_2O ha^{-1} e 50 kg de MgO ha^{-1} resultou em um aumento significativo de aproximadamente 2,8 vezes na atividade da enzima rubisco em comparação com o controle (Figura 6). No entanto, apesar desse notável aumento na atividade do rubisco sob esta combinação de K e Mg, a eficiência enzimática não se traduziu em um aumento de produtividade (Figura 4). A aplicação de doses menores de K_2O e MgO, especificamente 150 kg de K_2O ha^{-1} e 25 kg de MgO ha^{-1}, levou a um aumento médio de 78% na produtividade (Figura 2) em ambos os anos. Além disso, proporcionou aumento da concentração de pigmentos fotossintéticos em média de 50% (Figura 3). Essas informações sugerem que o uso de quantidades menores de fertilizantes pode resultar em melhorias na fisiologia e bioquímica das plantas de café, além de promover um aumento na produtividade.

Esses resultados destacam a importância de equilibrar a combinação de K e Mg para otimizar a função do rubisco nas plantas de café. Isso não apenas promove uma maior eficiência na fixação de dióxido de carbono (CO_2), mas também contribui para um metabolismo fotossintético mais eficiente e um maior produtividade das plantas de café. Essas descobertas enfatizam a relevância de K e Mg na otimização da função do rubisco e seu impacto positivo no crescimento e desenvolvimento das plantas de café.

Plantas deficientes em Mg apresentam acúmulo de sacarose nas folhas fonte. O K promove o carregamento de sacarose nos canais do floema e ativa a H+-ATPase, que está

localizada na membrana plasmática das células dos tubos crivosos e contribui para manter o carregamento de sacarose nos canais do floema (Epron et al., 2016). Observou-se que quando as combinações ideais de 150 kg de K_2O ha^{-1} e 25 kg de MgO ha^{-1} foram aplicadas em ambos os anos, o processo de translocação de açúcares da fonte (folhas) para o dreno (grãos) foi aprimorado (Figura 7). Esse carregamento eficiente de açúcares, facilitado pela presença equilibrada de K e Mg, pode estar relacionado ao aumento da produção do cafeeiro. Vários estudos que investigaram a aplicação de K e Mg fornecem resultados que respaldam os resultados relatados no presente estudo, conforme apresentado na Tabela 1.

Os aminoácidos livres, sob deficiência de Mg, podem se acumular nas folhas de origem. De acordo com Fischer et al. (1998), isso é resultante da inibição da síntese de proteínas ou da exportação tardia de assimilados pelo floema. Nesse caso, este efeito está relacionado a essencialidade do Mg como elemento ponte na agregação de subunidades de ribossomos, desempenhando assim, papel central na síntese de proteínas (Melnikov et al. 2016). Os ribossomos são estruturas macromoleculares responsáveis pela síntese de proteínas. Sua forma ativa requer o Mg para formar pontes entre ele e outras duas subunidades. Portanto, a deficiência de Mg pode inibir a montagem e atividade ribossomal, causando um forte acúmulo de aminoácidos livres nas folhas, conforme relatado em outros estudos (Masclaux-Daubresse et al., 2010; Yang et al. 2012).

Nesse estudo, pode ser verificado que a concentração de aminoácidos (Figura 10c-d) em tratamentos que possuem baixas doses de K e Mg obtiveram as maiores concentrações nas folhas do cafeeiro.

O uso eficiente e equilibrado de nutrientes essenciais, como K e Mg, pode resultar em benefícios econômicos e ambientais. A redução da necessidade de K em pelo menos 70%, visto que doses superiores a 250 kg ha^{-1} de K_2O são utilizadas em cultivos de café (Favarin et al., 2013), e a melhoria do metabolismo das plantas por meio da aplicação adequada de Mg, podem levar a práticas de produção com maior eficiência e sustentabilidade. Esse enfoque está alinhado com a busca contínua de métodos agrícolas que maximizem a produção de alimentos de maneira responsável e ambientalmente consciente.

Portanto, com base nos resultados obtidos neste estudo, observou-se que a aplicação de 150 kg ha^{-1} de K_2O e 25 kg ha^{-1} de MgO resultou em aumento da produtividade, maior concentração de pigmentos fotossintéticos, atividade aprimorada da enzima rubisco, redução da concentração de MDA e H_2O_2, aumento da atividade das enzimas: Superóxido dismutase

(SOD), Ascorbato peroxidase (APX) e Catalase (CAT), bem como aumento da translocação de açúcares das folhas para os grãos.

6. CONCLUSÃO

A aplicação de Mg em diferentes dosagens resultou em um aumento no rendimento das plantas de café. A interação entre K e Mg levou a um aumento na concentração de pigmentos fotossintéticos, na atividade da enzima rubisco, melhoria do sistema antioxidante e na otimização da translocação de açúcares da fonte (folhas) para o dreno (grãos). A combinação de 150 kg ha^{-1} de K_2O e 50 kg ha^{-1} de MgO trouxe benefícios não apenas para a fisiologia e bioquímica das plantas de café, mas também resultou na redução da necessidade de altas doses de K.

REFERÊNCIAS

Adhikari B, Dhungana SK, Kim ID, Shin, DH (2020). Effect of foliar application of potassium fertilizers on soybean plants under salinity stress. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences** 19:261–269.

Agathokleous E, Feng Z, Peñuelas J (2020). Chlorophyll hormesis: Are chlorophylls major components of stress biology in higher plants? **Science of The Total Environment**, 726: 138637.

Agathokleous E (2021). The rise and fall of photosynthesis: hormetic dose response in plants. **Journal of Forestry Research**. 32:889–898.

Alexieva V, Sergiev I, Mapelli S, Karanov E (2001). The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. **Plant, Cell & Environment**, 24:1337-1344.

Azevedo RA, Alas RM, Smith RJ, Lea PL (1998). Response of antioxidant enzymes to tranfer from eleveted carbon dioxide to air and ozone fumigation, in the leaves and roots of wild-type and a catalase-deficient mutant of barley. **Physiologia Plantarum**, 104:280–292.

Bhat JY, Thieulin-Pardo G, Hartl FU, Hayer-Hartl M (2017). Rubisco activases: AAA+ chaperones adapted to enzyme repair. **Frontiers in Molecular Biosciences**, 4:1-10.

Benites VM, Carvalho MCS, Resende AV, Polidoro JC, Bernardi ACC, Oliveira FA (2010). O potássio, o cálcio e o magnésio na agricultura brasileira. In: Prochnow LI, Casarin V, Stipp SR, (Org.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes.** Piracicaba: IPNI Brasil, 2:133-204.

BieleskI RL, Turner NA (1966). Separation and estimation of amino acids in crude plant extracts by thin-layer electrophoresis and chromatography. **Analytical Biochemistry**, 17:278-293.

Borrelli RC, Visconti A, Mennella C, Anese M, Fogliano V (2002). Chemical characterization and antioxidant properties of coffee melanoidins. **Journal of agricultural and food chemistry**, 50:6527-6533.

Buol SW (2009). Soils and agriculture in central-west and north Brazil. **Scientia Agricola**. 66, 697:707.

Cai J, Chen L, Qu H, Lian J, Liu W, Hu Y, Xu, G (2012). Alteration of nutrient allocation and transporter genes expression in rice under N, P, K, and Mg deficiencies. **Acta Physiologiae Plantarum**. 34:939–946.

Cai YT, Zhang H, Qi YP, Ye X, Huang ZR, Guo JX, Chen LS, Yang LT (2019). Responses of reactive oxygen species and methylglyoxal metabolisms to magnesium-deficiency differ greatly among the roots, upper and lower leaves of Citrus sinensis. **BMC plant biology**, 19:1-20.

Cakmak I, Hengeler C, Marschner H (1994). Changes in phloem export of sucrose in leaves in response to phosphorus, potassium and magnesium deficiency in bean plants. **Journal of Experimental Botany**. 45:1251–1257.

Cakmak I, Kirkby EA (2008). Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. **Physiologia Plantarum**, 133:692–704.

Cakmak I, Yazici AM (2010). Magnesium: A Forgotten Element in Crop Production. **Better Crop**. 94:23–25.

Cataldo DA, Haroon M, Schrader LE, Youngs VL (1975). Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 6:71-80.

Chen J, Li Y, Wen S, Rosanoff A, Yang G, Sun X (2017). Magnesium fertilizer-induced increase of symbiotic microorganisms improves forage growth and quality. **Journal of agricultural and food chemistry**, 65:3253-3258.

Chen ZC, Peng WT, Li J, Liao H (2018). Functional dissection and transport mechanism of magnesium in plants. In **Seminars in cell & developmental biology**, 74:142-152.

Conab. Companhia Nacional de Abastecimento (2022). Acompanhamento de safra brasileiro – café: quarto levantamento, dezembro 2022 – safra 2022. **Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento**.

Cunha MLO, Oliveira LCA, Silva VM, Montanha GS, Reis AR (2022). Selenium increases photosynthetic capacity, daidzein biosynthesis, nodulation and yield of peanuts plants (Arachis hypogaea L.), **Plant Physiology and Biochemistry**, 190:231-239.

Davì G, Falco A, Patrono C (2005). Lipid peroxidation in diabetes mellitus. **Antioxidants Redox Signal**. 7:256–268.

Dechen AR, Carmello QAC, Monteiro FA, Nogueirol RC (2015). Role of magnesium in food production: An overview. **Crop Pasture Science**. 66:1213–1218.

Dorenstouter H, Pieters GA, Findenegg GR (1985). Distribution of magnesium between chlorophyll and other photosynthetic functions in magnesium deficient “sun” and “shade” leaves of poplar. **Journal Plant Nutrition**. 8:1089–1101.

Dubois M, Gilles KA, Hamilton JK, Rebers PA, Smith F (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical Chemistry**, 28:350–356.

Epron D, Cabral OMR, Laclau JP, Dannoura M, Packer AP, Plain C, Battie-Laclau P, Moreira MZ, Trivelin PCO, Bouillet JP (2016). In situ 13CO2 pulse labelling of field-grown eucalypt trees revealed the effects of potassium nutrition and throughfall exclusion on phloem transport of photosynthetic carbon. **Tree physiology,** 36:6-21.

Erel R, Yermiyahu U, Ben-Gal A, Dag A, Shapira O, Schwartz A (2015). Modification of non-stomatal limitation and photoprotection due to K and Na nutrition of olive trees. **Journal of plant Physiology** , 177:1-10.

Ertiftik H, Zengin M (2017). Response of maize for grain to potassium and magnesium fertilizers in soils with high lime contents. **Journal of Plant Nutrition**, 40:93–103.

Farhat N, Elkhouni A, Zorrig W, Smaoui A, Abdelly C, Rabhi M (2016). Effects of magnesium deficiency on photosynthesis and carbohydrate partitioning. Acta **Physiologia Plantarum**, 38: 145.

Favarin JL, Paula Neto A, Tezotto T, Martins PO, Teixeira PPC (2013). Correção do magnésio no solo é essencial ao cafeeiro, 12:76-78.

Ferreira T, Schuler J, Guimarães R, Farah A (2019). Introduction to Coffee Plant and Genetics. In: FARAH, A. Coffee: production, quality and chemistry. **Royal Society of Chemistry**, 836:1-25.

Ferrão AMA (2004). Arquitetura do café. **Campinas: Editora da UNICAMP**, 2:1-296.

Fischer ES, Lohaus G, Heineke D, Heldt HW (1998). Magnesium deficiency results in accumulation of carbohydrates and amino acids in source and sink leaves of spinach. **Physiologia Plantarum**, 102:16-20.

Giannopolitis CN, Ries SK (1977). Superoxide dismutase I. Occurrence in higher plants. **Plant Physiology**, 59:309-314.

Guimarães RJ, Borém FM, Shuler J, Farah A, Romero JCP (2019). Coffee growing and post-harvest processing. In: Coffee: production, quality and chemistry. **Ed. Royal Society of Chemistry**, 836.

Gomes-Junior RA, Gratão PL, Gaziola SA, Mazzafera P, Lea PJ, Azevedo RA (2007). Selenium-induced oxidative stress in coffee cell suspension cultures. **Functional Plant Biology**, Victoria, 34:449-456.

Guo W, Nazim H, Liang Z, Yang D (2016). Magnesium deficiency in plants: An urgent problem. **Crop Journal**, 4:83–91.

Hawkesford M, Horst W, Kichey T, Lambers H, Schjoerring J, Møller IS, White P (2011). Functions of Macronutrients, Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. **Elsevier Ltd**, 3.

Hermans C, Verbruggen N (2005). Physiological characterization of Mg deficiency in Arabidopsis thaliana. **Journal of Experimental Botany**. 56:2153–2161.

Heynes WM (2014). CRC Handbook of chemistry and physics. Boca Raton, FL, **USA: CRC PRESS**, 95:1-2668

Heath RL, Packer L (1968). PHOTOPEROXIDATION in isolated chloroplasts. I. Kinects and stoichiometry of fatty acid peroxidation. **Archives in Biochemistry and Biophysics**, 125:189-198.

Huber DM, Jones JB (2013). The role of magnesium in plant disease. **Plant Soil,** 368:73–85.

Jezek M, Geilfus C, Bayer A, Mühling K (2015). Photosynthetic capacity, nutriente status, and growth of maize (Zea mays L.) upon MgSO4 leaf-application. **Frontiers in Plant Science | Crop Science and Horticulture**, 5:1-10.

Jin SH, Huang JQ, Li XQ, Zheng BS, Wu JS, Wang ZJ, Liu GH, Chen M (2011). Effects of potassium supply on limitations of photosynthesis by mesophyll diffusion conductance in Carya cathayensis. **Tree Physiology.** 31:1142–1151.

Kennedy OJ, Pirastu N, Poole R, Fallowfield JA, Hayes PC, Grzeszkowiak EJ, Taal MW, Wilson JF, Parkes J, Roderick PJ (2020). Coffee Consumption and Kidney Function: A Mendelian Randomization Study. **American Journal of Kidney Diseases.** 75:753–761.

Li CP, Qi YP, Zhang J, Yang LT, Wang DH, Ye X, Chen LS (2017). Magnesium-deficiency-induced alterations of gas exchange, major metabolites and key enzymes differ among roots, and lower and upper leaves of Citrus sinensis seedlings. **Tree physiology**, 37:1564-1581.

Lichtenthaler HK (1987). Chorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzimology**, 148:350-382.

Lopes AS (1983). Solos sob "cerrado": características, propriedades e manejo. **Piracicaba, SP Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato**, 2:1-162.

Malavolta E (2006). Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo: **Editora Agronômica Ceres Ltda**, 1:1-638.

Masclaux-Daubresse C, Daniel-Vedele F, Dechorgnat J, Chardon F, Gaufichon L, Suzuki A (2010). Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture. **Annals of botany**, 105:1141-1157.

Mccullough H (1967). The determination of ammonia in whole blood by a direct colorimetric method. **Clinica Chimica Acta**, 17:297–304.

Melnikov S, Mailliot J, Shin BS, Rigger L, Yusupova G, Micura R, Dever TE, Yusupov M, (2016). Crystal structure of hypusine-containing translation factor eIF5A bound to a rotated eukaryotic ribosome. **Journal of molecular biology**, 428:3570-3576.

Mendes NAC, Cunha MLO, Bosse MA, Silva VM, Moro AL, Agathokleous E, Vicente EF, Reis AR (2023). Physiological and biochemical role of nickel in nodulation and biological nitrogen fixation in Vigna unguiculata L. Walp, **Plant Physiology and Biochemistry**, 201, 107869.

Metro D, Cernaro V, Santoro D, Papa M, Buemi M, Benvenga S, ManasserI L (2017). Beneficial effects of oral pure caffeine on oxidative stress. **Journal of Clinical & Translational Endocrinology**, 10:22–27.

Moldes CA, Medici LO, Abrahão OS, Tsai SM, Azevedo RA (2008). Biochemical responses of glyphosate resistant and susceptible soybean plants exposed to glyphosate. **Acta Physiologia Plantarum**, 30:469-479.

Nardeli AJ, Lanza MGDB, Presumido Junior M, Santos MF, Reis AR (2016). Biofortificação agronômica de forrageiras com magnésio e benefícios para a saúde animal. **XXXVII Congresso Paranaense dos Estudantes de Zootecnia.**

Peng WT, Zhang LD, Zhou Z, Fu C, Chen ZC, Liao H (2018). Magnesium promotes root nodulation through facilitation of carbohydrate allocation in soybean. **Physiologia plantarum**, 163:372-385.

Raij BV, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JA (1997). Análise Química Para Avaliação da Fertilidade de Solos- Tropicais. Instituto Agronômico de Campinas, Campinas.

Reid CD, Tissue DT, Fiscus EL, Strain BR (1997). Comparison of spectrophotometric and radioisotopic methods for the assay of Rubisco in ozone- treated plants. **Physiologia Plantarum**, 101:398-404.

Reis AR, Favarin JL, Gratão PL, Capaldi FR, Azevedo RA (2015). Antioxidant metabolism in coffee (Coffea arabica L.) plants in response to nitrogen supply. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, 27:203-213.

Reis AR, El-Ramady H, Santos EF, Gratão PL, Schomburg L (2017). Overview of Selenium Deficiency and Toxicity Worldwide: Affected Areas, Selenium-Related Health Issues, and Case Studies. In: Pilon-Smits, Winkel L, Lin ZQ. (eds) Selenium in plants. **Plant Ecophysiology**, 11:209-230.

Rodrigues VA, Crusciol CAC, Bossulani JW, Moretti LG, Portugual JR, Mundt TT, Oliveira SL, Garcia A, Calonego JC, Lollato RP (2021). Magnesium foliar supplementation increases grain yield of soybean and maize by improving photosynthetic carbon metabolism and antioxidant metabolism. **Plants**. 10:1-797.

Saadati S, Baninasab B, Mobli M, Gholami M (2021). Foliar application of potassium to improve the freezing tolerance of olive leaves by increasing some osmolyte compounds and antioxidant activity. **Scientia Horticulturae**, 276:109765.

Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Lumbreras JF, Coelho MR, Almeida J A, Araujo Filho JC, Oliveira JB, Cunha TJF (2018). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília, **DF: Embrapa**, 5:1-355.

Senbayram M, Gransee A, Wahle V, Thiel H (2015). Role of magnesium fertilisers in agriculture: Plant-soil continuum. **Crop Pasture Science**, 66:1219–1229.

Sengik ES (2003). Os macronutrientes e os micronutrientes das plantas, 2003:22p.

Siddiqui MH, Alamri SA, Al-Khaishany MYY, Al-Qutami MA, Ali HM, Al-Whaibi MH, Al-Wahibi MS, Alharby HF (2018). Mitigation of adverse effects of heat stress on Vicia faba by exogenous application of magnesium. **Saudi Journal Biological Science**, 25:1393–1401.

Silva DM, Souza KRD, Boas LVV, Alves YS, Alves JD (2017). The effect of magnesium nutrition on the antioxidant response of coffee seedlings under heat stress. **Scientia Horticulturae**, 224:115-125.

Silva VM, Tavanti RFR, Gratão PG, Alcock TD, Reis AR (2020). Selenate and selenite affect photosynthetic pigments and ROS scavenging through distinct mechanisms in cowpea (Vigna unguiculata (L.) walp) plants, **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 201:110777.

Tanoi K, KobayashI NI (2015). Leaf senescence by magnesium deficiency. **Plants** 4:756–772.

Tavakol E, Jákli B, Cakmak I, Dittert K, Senbayram M (2022). Optimization of Potassium Supply under Osmotic Stress Mitigates Oxidative Damage in Barley. **Plants (Basel)**, 11, 55.

Tian XY, He DD, Bai S, Zeng WZ, Wang Z, Wang M, Wu L, Chen, Z (2021). Physiological and molecular advances in magnesium nutrition of plants. **Plant Soil**, 468:1–17.

Torabian S, Salar F, Ruijun Q, Christos N, Vidyasagar S, Brian C, Dimitra AL (2021). "Potassium: A Vital Macronutrient in Potato Production—A Review", **Agronomy**, 3:543.

Tränkner M, Jákli B, Tavakol E, Geilfus CM, Cakmak I, Dittert K, Senbayram M (2016). Magnesium deficiency decreases biomass water-use efficiency and increases leaf water-use efficiency and oxidative stress in barley plants. **Plant Soil**, 406:409-423.

Tränkner M, Tavakol E, Jákli B (2018). Functioning of potassium and magnesium in photosynthesis, photosynthate translocation and photoprotection. **Physiologia plantarum**, 163:414-431.

Van Dam RM, Hu FB (2005). Coffee Consumption A Systematic Review. **Journal of the American Medical Associantion,** 294:97–104.

Verbruggen N, Hermans C (2013). Physiological and molecular responses to magnesium nutritional imbalance in plants. **Plant and soil**, 368:87-99.

Von Wettstein D (1991). Chlorophyll Biosynthesis. In: Herrmann, R. G., Larkins, B. A. (eds) Plant Molecular Biology 2. **NATO ASI Series**, 212:449-459.

Xie K, Cakmak I, Wang S, Zhang F, Guo S (2021). Synergistic and antagonistic interactions between potassium and magnesium in higher plants. **The Crop Journal**, 9:249-256.

Wlend T. (2007). Magnésio nos solos e nas plantas. **International Plant Nutrition Institute-Brazil**, Informações agronômicas, 117:19-21.

Yang GH, Yang LT, Jiang HX, Li Y, Wang P, Chen LS (2012). Physiological impacts of magnesium-deficiency in Citrus seedlings: photosynthesis, antioxidant system and carbohydrates. **Trees**, 26:1237-1250.

Yang LT, Yang GH, You X, Zhou CP, Lu YB, Chen LS. (2013). Magnesium deficiency-induced changes in organic acid metabolism of Citrus sinensis roots and leaves. **Biologia Plantarum**, 57:481-486.

Yang N, Jiang J, Xie H, Bai M, Xu Q, Wang X, Guan Y (2017). Metabolomics reveals distinct carbon and nitrogen metabolic responses to magnesium deficiency in leaves and roots of soybean [Glycine max (Linn.) Merr.]. **Frontiers in Plant Science**, 8:2091.

Yemm EM, Cocking EC (1955). The Determination of Amino Acids with Ninhydrin. **Analyst**, 80:209-213.

Yin S, Ze Y, Liu C, Li N, Zhou M, Duan Y, Hong F (2009). Cerium relieves the inhibition of nitrogen metabolism of spinach caused by magnesium deficiency. **Biological trace element research**, 132:247-258.

Yuguan Z, Min Z, Luyang L, Zhe J, Chao L, Sitao Y, Yanmei D, NA L, Fashui H (2009). Effects of cerium on key enzymes of carbon assimilation of spinach under magnesium deficiency. **Biological Trace Element Research**. 131:154–164.