

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Resposta do cafeeiro arábica ao magnésio em solos fertilizados
com altas doses de potássio**

Pedro Paulo de Carvalho Teixeira

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração:
Fitotecnia

**Piracicaba
2016**

Pedro Paulo de Carvalho Teixeira
Engenheiro Agrônomo

Resposta do cafeeiro arábica ao magnésio em solos fertilizados com altas doses de potássio

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ LAÉRCIO FAVARIN**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

Piracicaba
2016

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Teixeira, Pedro Paulo de Carvalho

Resposta do cafeeiro arábica ao magnésio em solos fertilizados com altas doses de potássio / Pedro Paulo de Carvalho Teixeira. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2016.

43 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Textura do solo 2. Lixiviação 3. Concentração foliar I. Título

CDD 633.73
T266r

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

SUMÁRIO

RESUMO.....	5
ABSTRACT	7
1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1 Funções do magnésio	11
2.2 Magnésio nos solos.....	13
2.3 Interação entre magnésio e potássio	14
2.4 Interpretação da análise de solo para magnésio.....	15
2.5 Potássio e Magnésio no cafeeiro	16
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	19
3.1 Área experimental	19
3.2 Preparo da área experimental.....	21
3.2 Delineamento experimental e tratamentos.....	22
3.3 Avaliações.....	23
3.3.1 Concentração dos teores foliares de macro e micronutrientes.....	23
3.3.2 Produtividade	23
3.3.3 Análise de solo	24
3.4 Análises estatísticas.....	24
4 RESULTADOS	25
4.1 Produtividade	25
4.2 Teores foliares de magnésio, potássio, cálcio e fósforo.....	25
4.3 Teores trocáveis de magnésio, potássio e cálcio no solo.....	28
5 DISCUSSÃO	33
6 CONCLUSÕES	37
REFERÊNCIAS.....	39

RESUMO

Resposta do cafeeiro arábica ao magnésio em solos fertilizados com altas doses de potássio

O aumento das doses de potássio (K) para atender a demanda nutricional desse nutriente em cafezais produtivos induz a deficiência de Mg. Esta pesquisa foi realizada com o objetivo de compreender como a classe de solo interfere na interação entre esses nutrientes (K e Mg), de maneira que a aplicação de alta dose de K não afete a nutrição da planta em relação ao Mg. Dois experimentos foram conduzidos em duas classes de solo: Latossolo, com textura muito argilosa, em Machado-MG, e Argissolo, com textura média sobre argilosa, em Monte Santo de Minas-MG. Adotou-se delineamento fatorial com três doses de K (110, 260 e 390 kg ha⁻¹ K₂O) x cinco doses de Mg (0, 81, 162, 324 e 405 kg ha⁻¹ MgO), com três repetições. No Argissolo, a lixiviação de K impediu a redução da concentração foliar de Mg, independentemente da dose de K. No Latossolo, a concentração de Mg foliar variou com a dose de K, e apresentou ajuste quadrático. A concentração foliar de Mg aumentou linearmente com a dose desse nutriente, independentemente da classe de solo e da dose de K.

Palavras-chave: Textura do solo; Lixiviação; Concentração foliar

ABSTRACT

Response of arabica coffee crop to magnesium in soils fertilized with high levels of potassium

The increasing levels of potassium (K) applied to attend coffee nutritional demand has induced a widespread of Magnesium (Mg) deficiency. The purpose of this research is to understand how the soil features interfere on the interaction between these nutrients (K and Mg) in the coffee, to guide the management of potassium fertilizer, where the application of high doses of K does not interfere with nutritional status the coffee with respect to Mg. Two experiments were conducted in contrasting soil classes at two sites: Oxisol, with a clay textured soil at Machado-MG, and an Ultisol, with medium texture at Monte Santo de Minas, in a factorial design with three rates of K (110, 260 and 390 kg ha⁻¹ K₂O) x 5 rates of Mg (without Mg, 81, 162, 324 and 405 kg ha⁻¹ MgO) with three replications. On the Ultisol, K leaching prevented the reduction of leaf Mg content, independently of the application rate of K. On Oxisol, leaf Mg content was modified according to K rate, and presented quadratic adjust. Mg leaf content was enhanced linearly with the application of this nutrient, independently of the soil class and the K rate.

Keywords: Soil texture; Leaching; Leaf content

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A cafeicultura brasileira destaca-se pelo uso intensivo de tecnologia. Entre as inovações recentes, têm-se a irrigação, o manejo da fertilidade, de pragas e doenças, o plantio adensado, entre três e cinco mil plantas por hectare e uso de poda. A adoção destas tecnologias aumentou a produtividade dos cafezais e, em consequência, as doses de fertilizantes, especificamente dos mais exportados como: o potássio (K) e o nitrogênio (N). O cafeeiro é uma planta exigente em fertilidade, a qual exporta nos grãos quantidades da ordem de 2,6 kg de N, 2,8 kg de K e 0,14 kg de fósforo (P) por saca de 60 kg de café beneficiado (GARCIA et al., 2008). Dentre os nutrientes, o K é o mais exportado na casca e nos grãos, razão de ter de aplicar dose superior a 350 kg ha⁻¹ de K₂O em lavouras com produtividade acima de 40 sacas ha⁻¹.

Nas áreas em que essas doses de K são aplicadas é comum a redução da concentração foliar de magnésio (Mg) para valores inferiores ao limite crítico. Nestes casos é inevitável o sintoma visual de carência de Mg, mesmo quando o solo possui uma teor dentro da classe de teor médio (5 a 8 mmol_c dm⁻³) (RAIJ et al., 1997). A deficiência de Mg induzida pelo K é conhecida na literatura, conforme descrito em revisões recentes sobre nutrição de plantas por Maathuis & Podar (2011) e Hawkesford et al. (2012). Portanto, altas doses de K podem contribuir para o aparecimento de deficiência de Mg no cafeeiro.

As interações entre nutrientes ocorrem quando o fornecimento de um determinado elemento afeta a absorção, distribuição ou a utilização de outro. Nos sistemas de produção de café, são frequentes lavouras com produções entre 40 sacas e 50 sacas ha⁻¹ onde há necessidade de aplicadas entre 300 e 450 kg ha⁻¹ de K₂O a fim de manter a produtividade e a longevidade do cafezal. No entanto, nesses sistemas, a deficiência de Mg é mais comum, ainda que a quantidade de Mg esteja dentro da classe de teor médio (5 a 8 mmol_c dm⁻³), onde é baixa a probabilidade de resposta ao fornecimento desse nutriente.

Com base no exposto, foi realizada a presente pesquisa com objetivo de compreender a interação entre esses nutrientes (K e Mg) na cultura de café, a fim de orientar a fertilização potássica, de maneira que a aplicação desse elemento (K) não prejudique o estado nutricional da planta em relação ao Mg.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Funções do magnésio

As funções do Mg na planta estão relacionadas à sua capacidade de interagir fortemente com componentes nucleofílicos de proteínas, por ser capaz de determinar a sua estrutura ou aumentar a eficiência de suas reações catalíticas (HAWKESFORD et al., 2012). O Mg absorvido é transportado na planta na forma de Mg^{2+} , e acumula nas partes jovens devido a sua elevada mobilidade. A deficiência de Mg no cafeeiro é caracterizada pelo sintoma de amarelecimento na forma de reticulado grosso, ocorrendo inicialmente nas folhas mais velhas. A maior parte do Mg está contido nas folhas, principalmente pelo fato de ser um dos constituintes da molécula de clorofila. O Mg também é especialmente importante para o transporte de açúcares na planta, uma vez que plantas deficientes apresentam uma menor relação raiz/parte aérea (CAKMAK, 1994; MARSCHNER et al., 1996) e ainda, acumulam açúcares nas folhas (HERMANS et al., 2005).

Nas folhas, pode-se dividir o Mg em três frações: Mg ligado a clorofila, Mg precipitado na parede celular (fração insolúvel) e Mg solúvel (FINK, 1992). A quantidade de Mg^{2+} ligada à clorofila é variável de acordo com a disponibilidade (SCOTT; ROBSON, 1990). Geralmente, a quantidade de Mg na constituição da clorofila varia entre 6% e 25%, enquanto que 5% a 10% estão ligados a pectina nas paredes celulares ou precipitados na forma de sais no vacúolo (FINK, 1992; HAWKESFORD et al., 2012). O restante, cerca de 60% a 90% do Mg é solúvel e pode ser extraído com água (HAWKESFORD et al., 2012).

Além de componente estrutural da clorofila, o Mg também participa de sua síntese. A enzima Mg-quelatase catalisa o primeiro passo da formação da clorofila, por meio da inserção desse cátion na protoporfirina IX (WALKER; WEINSTEIN, 1991). A deficiência de Mg^{2+} leva ao acúmulo de protoporfirina IX, a qual é tóxica e explica o sintoma da clorose nas folhas deficientes em Mg (CAKMAK; KIRKBY, 2008).

A deficiência de Mg reduz a condutividade estomática e a atividade da enzima envolvida na fixação do CO_2 , como a RuBP-carboxilase. O Mg exerce uma importante função no transporte de elétrons nos Fotossistemas I e II. Durante o transporte de elétrons, prótons são bombeados do estroma para o lúmen do

tilacóide, o qual fica mais ácido. Esse processo resulta no gradiente eletroquímico necessário à síntese de ATP. O transporte de prótons para a membrana do tilacóide é contrabalanceada pelo transporte de Mg^{2+} do lúmen ao estroma (CAKMAK; KIRKBY, 2008; SHAUL, 2002). O fornecimento de Mg, portanto, contribui para aumento da formação de ATP na fase fotoquímica da fotossíntese (SHABALA; HARIADI, 2005).

Uma resposta comum das plantas com deficiência de Mg está relacionada aos aumentos dos níveis de antioxidantes e das atividades das enzimas antioxidativas. O aumento dos níveis desses componentes é um dos primeiros sinais da deficiência de Mg, e precede o início da degradação de clorofila e a redução na taxa de crescimento da planta (CAKMAK; KIRKBY, 2008). Em plantas deficientes em Mg, o fluxo de elétrons não funciona adequadamente, e, assim, ocorre um excedente de energia não usada no cloroplasto. Essa sobra de energia propicia a formação de espécies reativas de oxigênio, como os radicais superóxido (O_2^-), peróxido de hidrogênio (H_2O_2), radicais hidroxila (OH^-) e oxigênio singlete (1O_2) que degradam as membranas lipídicas e causam a morte celular.

Na síntese proteica, o Mg atua como elemento de agregação das subunidades ribossômicas (SPERRAZZA; SPREMULLI, 1983). Portanto, sob deficiência de Mg, aumenta-se a taxa de degradação proteica, incluindo proteínas estruturais dos tilacóides. Como cerca de 25% da quantidade total de proteína localiza-se nos cloroplastos, a deficiência de Mg resulta em clorose nas folhas (HAWKESFORD et al., 2012).

Outro efeito marcante da deficiência de Mg, está relacionado à partição de carboidratos. Plantas deficientes possuem um menor crescimento radicular e menor relação raiz/parte aérea (CAKMAK; KIRKBY, 2008). Há consenso entre os pesquisadores acerca da deficiência de Mg sobre o acúmulo de carboidratos nas folhas (SCOTT; ROBSON, 1990). Entretanto, o fornecimento de Mg para plantas deficientes reestabelece rapidamente a translocação de açúcar, independente da disponibilidade de luz (CAKMAK et al., 1994). Nesse sentido, acredita-se que o Mg tenha importante função no carregamento de carboidratos no floema. O carregamento de carboidratos no floema é um processo ativo, dependente do consumo de ATP, que por sua vez, também necessita de Mg. O acúmulo de açúcares não estruturais nas folhas e a alteração na partição de carboidratos

observados sob deficiência de Mg são atribuídos a inibição do carregamento floemático (HAWKESFORD et al., 2012).

2.2 Magnésio nos solos

O Mg é o oitavo elemento mais abundante na Terra (COWAN; MAGUIRE, 2002). No solo, está associado principalmente à fração mineral nas formas não-trocável, trocável e na solução do solo (DECHEN; NACHTIGALL, 2007).

As plantas absorvem diretamente o Mg da solução, que é tamponado pela fração trocável via troca iônica. Na fração trocável, o Mg forma ligações fracas com os colóides do solo (argila e matéria orgânica), denominadas interações eletrostáticas (BOHN, 2002). A troca iônica corresponde à passagem dos íons da fração trocável para a solução, cuja característica é ser extremamente rápida. Considera-se que a fração trocável é aquela disponível às plantas, de maior interesse agrônômico. A fração trocável obtém-se de soluções de sais ou ácidos diluídos em temperatura ambiente (METSON, 1974). Esse processo, também extrai o Mg presente na solução do solo, que na maioria dos casos é muito pequena.

A fração não trocável também repõe as demais frações e pode ser importante como fonte desse nutriente às plantas, embora a velocidade de reposição seja muito inferior à da fração trocável (METSON, 1974). Os minerais primários e secundários constituem a maior fonte da fração não trocável de Mg no solo. Os principais minerais capazes de fornecer Mg são os minerais ferromagnesianos, como a olivina, piroxênio e anfibólio. Alguns minerais secundários como os carbonatos (dolomita e magnesita) e outros, como clorita, serpentinita e minerais micáceos também liberam Mg, e, portanto, também, fazem parte da fração de Mg não trocável.

Em solos brasileiros muito intemperizados há pequena quantidade de Mg total, indicativo de uma baixa reserva desse nutriente (MELO et al., 2004). Nos solos intemperizados as reservas de Mg estão ligadas principalmente a presença da caulinita, que perfaz mais de 50% da quantidade de Mg total. Minerais micáceos também podem ser fontes de Mg, especialmente nos solos mais jovens.

Em ensaio de cinética de liberação de Mg com solos do Triângulo Mineiro observou-se a liberação de quantidades elevadas de Mg não trocável (MELO et al., 2005). A maior liberação de Mg ocorreu na fração argila de Argissolos desenvolvidos

de arenito da Formação Uberaba. Mesmo em Latossolos verificou-se a liberação de teores acumulados de Mg relativamente altos em comparação com o teor trocável. A quantidade da Mg não trocável depende da origem do solo, e do intemperismo. Mesmo a caulinita pode ser uma importante fonte de Mg não trocável, devido a ocorrência de camadas residuais de mica preservadas no interior da estrutura do mineral.

2.3 Interação entre magnésio e potássio

As interações entre os nutrientes ocorrem quando o fornecimento de determinado nutriente afeta a absorção, distribuição ou a utilização de outro nutriente (ROBSON; PITMAN, 1983). A interação entre o K e o Mg é do tipo competitiva, na qual o fornecimento de um promove a redução do outro. Entretanto, ainda não há consenso sobre o mecanismo da interação entre o K e o Mg estabelecido entre os pesquisadores (MAATHUIS; PODAR, 2012), embora esse fenômeno seja amplamente relatado na literatura (ROBSON; PITMAN, 1983; GRANSEE; FÜHRS, 2012).

Estudos de cinética de absorção foram pioneiros na constatação da existência da interação entre K e Mg. Em soja, Heenan e Campbell (1981) observaram que o aumento dos níveis de K reduziram severamente os teores foliares de Mg. Fonseca e Meurer (1997) observam efeito inibitório de altas concentrações de K na absorção de Mg pelas raízes de milho, apesar das altas concentrações de Mg não prejudicarem a absorção de K. Fageria (1973), em amendoim, observou que o fornecimento de Mg reduziu a absorção de K.

Uma das hipóteses mais aceita em relação a interação entre K e Mg é a de que o K e o Mg são absorvidos por meio dos mesmos transportadores de membrana, nessa absorção o K teria preferência por apresentar um menor raio hidratado (GRANSEE; FÜHRS, 2012). O cátion Mg^{2+} possui raio iônico pequeno (0,065 nm) além de possuir uma elevada densidade de carga. Isso faz com que atraia fortemente as moléculas de água do seu entorno, formando uma espessa camada hidratada. O volume do Mg^{2+} hidratado é cerca de 400 vezes o tamanho do cátion sozinho, enquanto o volume do K^+ é apenas quatro vezes maior (MAGUIRE; COWAN, 2002). Acredita-se que a camada hidratada deve ser removida para o íon se ligar ao transportador. No caso do Mg, portanto, a maior energia de hidratação

dificulta a remoção da camada hidratada, o que causa a dificuldade de sua absorção pelas plantas (GRANSEE; FÜHRS, 2012).

Muitos avanços já foram feitos para elucidar o mecanismo de absorção dos nutrientes pelas plantas, principalmente no caso do K. Atualmente sugere-se a existência de dois mecanismos reguladores do aporte de K nas células em função da nutrição da planta em relação ao nutriente (BRITTO; KRONZUCKER, 2008). Em condições de deficiência, o padrão de absorção do K segue o modelo de Michaelis-Menten, denominado mecanismo de absorção de alta afinidade (HATS), o qual consome energia para absorver o K da solução (HAWKESFORD et al., 2012).

Em condições de elevada disponibilidade de K, a absorção é descrita pelo mecanismo de baixa afinidade (LATS). Nesse caso, a absorção é mediada por canais, que são transportadores de membrana, os quais não sofrem saturação (EPSTEIN et al., 1963). Em razão disso, a absorção de K não cessa mesmo quando as plantas estão bem supridas desse nutriente. O acúmulo de K nos tecidos, sem o proporcional aumento de produção é referida como consumo de luxo de K (HAWKESFORD et al., 2012). Acredita-se que o Mg possua um mecanismo de absorção parecido com o K (SHABALA; HARIADI, 2005), apesar de seus transportadores ainda não serem totalmente identificados (MAATHUIS; PODAR, 2012).

Recentemente, alguns estudos demonstram os primeiros indícios do funcionamento da interação entre K e Mg por meio da expressão gênica. Em arroz, Horie et al. (2011) observaram que os principais transportadores de K também transportavam Mg e Ca, apesar das diferenças de raios hidratados dos elementos. Cai et al. (2011) estudaram o efeito da deficiência de K e de Mg na expressão dos transportadores desses cátions em arroz. Os autores observaram que a expressão de um suposto gene transportador de K em raízes de arroz foi estimulada em condições de deficiência de Mg. O aumento da expressão de transportadores de K em condições de deficiência de Mg comprova a existência da interação entre os mesmos, está relacionada aos transportadores.

2.4 Interpretação da análise de solo para magnésio

A resposta à adubação depende da disponibilidade do nutriente no solo, que é dada pelo teor trocável, desde que outros nutrientes não sejam limitantes. No caso

do Mg e outros cátions como o K e Ca, existem controvérsias em relação ao melhor índice que relacione teor do nutriente com a produtividade da cultura (RAIJ, 2012). Essa controvérsia deriva principalmente da existência da interação entre esses nutrientes. Inúmeras pesquisas demonstraram que a absorção de Mg não correlaciona bem com o teor trocável, obtido pelas análises de solos (BÜLL, 1998). De acordo com esses artigos a disponibilidade de Mg não depende apenas do teor trocável, mas também dos teores trocáveis de outros cátions, como K e Ca, em razão da interação entre os mesmos.

A maioria dos laboratórios usa o conceito de Nível de Suficiência de Nutrientes Disponíveis (NSND) para interpretar os dados de análise de solo. Contudo, no caso de recomendações mais práticas, é comum o uso de relações ou a porcentagem de cátions na CTC como índice para recomendação da adubação.

Seggeweiss e Jungk (1988) estudaram o efeito da adubação potássica na dinâmica de Mg no solo e na absorção em diversas culturas. Em um primeiro experimento houve uma redução muito rápida na concentração de K na região próxima da raiz das plantas. Em seguida, a absorção de Mg que era baixa, aumentou significativamente. Todavia, quando foi fornecido o K, a concentração do mesmo se manteve elevada durante todo experimento, e a absorção de Mg foi severamente prejudicada. Em um segundo experimento, os autores coletaram amostras da solução do solo para analisar o efeito do fornecimento de K na distribuição dos cátions entre o complexo de troca e a solução. Observaram que o fornecimento de K, além de aumentar a concentração de K na solução, aumentou o Mg em quase três vezes.

2.5 Potássio e Magnésio no cafeeiro

O Magnésio é o quarto elemento mais extraído pelo cafeeiro (CORRÊA et al., 1986). Não existe muita diferença na extração de Mg entre os cultivares Catuaí (1,03 g saca⁻¹) e Mundo Novo (0,99 g saca⁻¹).

Existe variação na concentração de Mg nas flores, folhas e frutos do cafeeiro com o estágio fenológico. No florescimento, as flores são dreno de nutrientes, principalmente de Mg (MALAVOLTA et al., 2002). A quantidade de Mg extraída pelas folhas no momento do florescimento corresponde a 52% do total extraído pelas flores, folhas e ramos.

Nos frutos, a maior concentração de Mg ocorre após o florescimento, no estágio chumbinho (LAVIOLA et al., 2007). A concentração começa a declinar a partir da expansão rápida, em razão do grande acúmulo de matéria. No terceiro e quarto pares de folhas de ramos produtivos a concentração de Mg no início do período reprodutivo se mantém constante. Entretanto, nas fases de expansão rápida do fruto e maturação, a concentração de Mg nas folhas aumenta, mesmo na presença de frutos.

Para a cultura do café usam-se os dois tipos de interpretação para teores de Mg no solo. Na África, Forestier (1964) correlacionou o teor trocável de Mg e K com a análise foliar de diversas lavouras, verificou que a deficiência de Mg no café robusta dependia da relação Mg/K e da porcentagem de K na soma de bases. Para solos com menos de 11% de K na soma de bases, a relação de Mg/K deve ser superior a 2, enquanto em solos com mais de 11% de K, a relação Mg/K deve ser pelo menos 3.

Bricenõ e Carvajal (1972) investigaram a baixa resposta da adubação potássica nas lavouras de café da Costa Rica. Os autores observaram que solos com relação Mg/K entre 1 e 8 não respondiam a adubação potássica. Contudo, quando os solos apresentavam relação Mg/K entre 16,5 e 8 havia resposta a adubação potássica. Os autores atribuíram a resposta do K ao desequilíbrio de Mg no solo, e concluíram que a relação ótima entre Mg e K era igual a 3.

Boyer (1978) separou as relações entre Mg/K de acordo com o grau de deficiência do Mg nos solos. Para solos ricos em Mg (mais que 10 mmol/dm³), a relação de Mg/K deve ser maior que 2. Para solos, com até 3 mmol/dm³ de Mg, a relação Mg/K deve ser até 3, e solos com menos que 3 mmol/dm³ de Mg, a relação deve ser de pelo menos 4.

Para solos brasileiros não existem trabalhos sobre a relação Mg/K na cultura do café. Garcia et al. (1985) estudaram a resposta do cafeeiro a fontes e doses de magnésio no Brasil. Quando os tratamentos foram aplicados na implantação da lavoura, a melhor fonte de Mg foi a combinação de calcário dolomítico com sulfato de magnésio (MgSO₄), seguido pelo calcário dolomítico. Quando a aplicação foi feita após a implantação, a resposta ao MgSO₄ foi similar ao calcário dolomítico, onde verificou-se resposta em produtividade ao fornecimento de 69 kg ha⁻¹ de Mg. As melhores fontes foram óxido de magnésio e calcário calcinado, enquanto a aplicação foliar de sulfato de Mg foi ineficiente. Carvajal (1984) recomenda a aplicação de 230

kg ha⁻¹ de MgSO₄ ou 230 kg ha⁻¹ de Magnesita, em solos que se espera resposta a aplicação do nutriente.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área experimental

O experimento foi realizado no período 2013-2014 em duas lavouras comerciais (Tabela 1). As áreas experimentais apresentavam condições edafoclimáticas distintas, embora com similaridade em tratos culturais e baixo teor de Mg no solo.

A primeira área experimental localiza-se na Fazenda Muricy, no município de Machado-MG, situada à 895 m de altitude nas coordenadas 21° 41' 35" S; e 45° 51' 00" O. O clima da região é classificado como tropical de altitude (Cwa), com inverno seco e verão ameno (KÖPPEN, 1936). O solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico (EMBRAPA, 2006), com 707 g kg⁻¹ de argila na camada de 0-20 cm (Tabela 2). A lavoura constitui-se de plantas da espécie *Coffea arabica* L., cultivar Catuaí Vermelho com 5 anos de idade, em espaçamento de 3,8 m x 0,9 m (2.924 plantas ha⁻¹).

A segunda área experimental, situada na Fazenda Colina no município de Monte Santo de Minas-MG, encontra-se à 1105 m de altitude nas coordenadas 21° 12' 24" S; e 47° 04' 00" O. O clima da região também é classificado como Cwa (KÖPPEN 1936). O solo pertence a classe Argissolo Vermelho-amarelo (EMBRAPA, 2006), contendo 165 g kg⁻¹ de argila na camada de 0-20 cm (Tabela 2). A lavoura é formada de plantas da espécie *Coffea arabica* L., cultivar Catuaí Vermelho, também com 5 anos de idade, em espaçamento de 3,2 m x 0,7 m (4.465 plantas ha⁻¹).

Tabela 1 - Descrição das áreas experimentais

Dados	Machado – MG	Monte Santo - MG
Clima ¹	Cwa	Cwa
Altitude	895 m	1105 m
Espaçamento	3,8 m x 0,9 m	3,2 m x 0,7 m
População de plantas por ha	2924 plantas ha ⁻¹	4465 plantas ha ⁻¹
Idade da lavoura	5 anos	5 anos
Cultivar	Catuaí Vermelho	Catuaí Vermelho
Florescimento principal	10/2013	10/2013

⁽¹⁾ Classificação climática, segundo Köppen, (1936)

Tabela 2 - Descrição dos solos das áreas experimentais em Machado e Monte Santo de Minas

Local	Solo ¹	Argila	Silte	Areia
		< 0,002 mm	0,002 – 0,053 mm	> 0,0053 mm
		g kg ⁻¹		
Machado	LVd ²	707	33	260
Monte Santo de Minas	PVAd ³	165	15	820

¹ EMBRAPA (2006); ² Latossolo Vermelho distrófico; ³ Argissolo Vermelho-amarelo

A tabela 3 apresenta os resultados da análise de solo dos primeiros 20 cm das áreas experimentais, coletadas três meses antes da instalação do experimento. As áreas experimentais apresentavam teor baixo de Mg, igual a 4 mmol_c dm⁻³ (RAIJ, 1997). Essa característica era evidenciada pelos sintomas visuais de deficiência de Mg nas duas lavouras.

Tabela 3 – Resultados da análise de solo antes da instalação dos experimentos em Machado (A) e Monte Santo de Minas (B) em setembro de 2013

Localidades	pH	MO	P	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V	S-SO ₄
	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----mmol _c dm ⁻³ -----							%
Machado	4,7	37	6	2,3	19	4	58	25,3	83	30	12
Monte Santo Minas	5,1	14	7	1,6	15	4	34	21	55	38	8

pH em CaCl₂ 0,01mol L⁻¹ (acidez ativa), MOS (matéria orgânica do solo) – dicromato/colorimétrico; P, K, Ca e Mg – extração pela resina trocadora de íons; H+Al (acidez potencial); enxofre (S-SO₄), extração com Ca(H₂PO₄)₂ 0,01mol L⁻¹

As figuras 1 e 2 representam a comparação dos dados de precipitação pluvial e temperatura média do período de condução do experimento em comparação com as médias históricas, em Machado-MG e Monte Santo de Minas (MG), respectivamente.

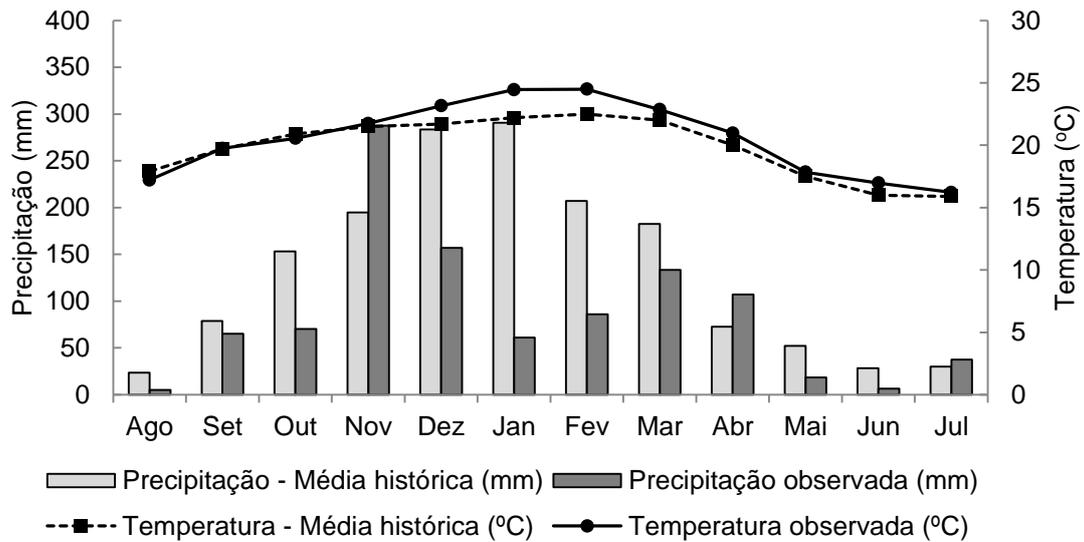


Figura 1 - Precipitação pluviométrica (mm) e temperatura média (°C) em Machado (MG), no período de agosto de 2013 a julho de 2014 com dados coletados na estação meteorológica da cidade, em comparação com as respectivas médias históricas (INMET, 2015)

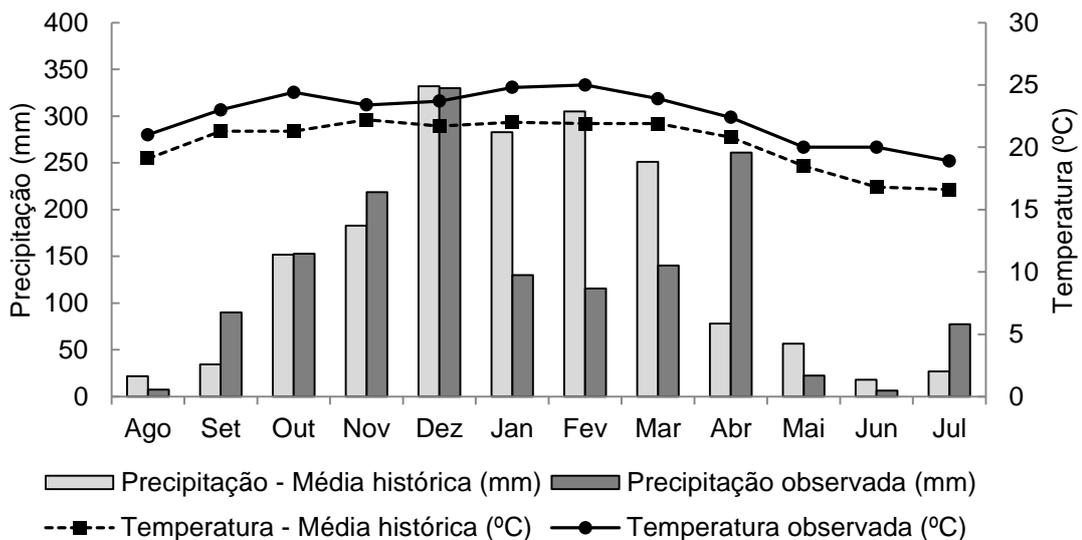


Figura 2 - Precipitação pluviométrica (mm) e temperatura média (°C) em Monte Santo de Minas (MG), no período de agosto de 2013 a julho de 2014 com dados coletados na estação meteorológica da cidade em comparação com as respectivas médias históricas (INMET, 2015)

3.2 Preparo da área experimental

Com base nos resultados da análise de solo inicial das áreas (tabela 3), verificou-se baixa saturação por bases, pH ácido e teor de P inferior ao nível crítico para planta perene - 13 mg dm^{-3} (RAIJ et al., 1997). Para corrigir esses problemas realizou-se a calagem e a aplicação de fósforo solúvel.

A dose de calcário foi calculada para 50% de saturação por bases (RAIJ, et al. 1997). Para tanto, aplicou-se calcário calcítico com baixo teor de Mg (36% CaO;

1% MgO; PRNT 85%) para não interferir nos tratamentos, os quais foram obtidos com uma fonte solúvel de Mg. A dose de calcário utilizada em Machado foi 2,0 Mg ha⁻¹ e 1,0 Mg ha⁻¹ em Monte Santo de Minas. A calagem foi feita em setembro de 2013, três meses antes da instalação dos tratamentos. Para a correção de fósforo aplicou-se 120 kg e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ em Machado e Monte Santo, nessa ordem. A aplicação de fósforo solúvel na forma de superfosfato simples (18% P₂O₅) ocorreu dois meses antes do início do experimento.

3.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com três repetições, em esquema fatorial 3 x 5 (3 doses de K₂O e 5 doses de MgO). Cada parcela constituiu-se de 14 plantas dispostas em duas linhas. As avaliações foram feitas na área útil da parcela, considerando cinco plantas por linha central, o que totalizou 10 plantas coletadas, em 45 unidades experimentais por local.

O K foi aplicado nas doses: 110 kg, 260 kg e 390 kg de K₂O ha⁻¹ em três épocas (09/11/2013, 16/01/2014 e 14/03/2014), no início, meio e fim da estação chuvosa na forma de cloreto de potássio. As doses de Mg foram: 0 kg, 81 kg, 162 kg, 324 kg e 405 kg ha⁻¹ de MgO, aplicadas em uma única vez em 09/11/2013.

O Mg foi aplicado na forma de sulfato de magnésio (MgSO₄), com 9% de Mg solúvel. As doses foram definidas de modo a elevar o teor de Mg trocável (4, 6, 8, 12 e 15 mmol_c dm⁻³) (Tabela 4). Por exemplo, para elevar a 6 mmol_c dm⁻³ de Mg, aplicou-se o equivalente à 2 mmol_c dm⁻³ que corresponde à 540 kg ha⁻¹ de MgSO₄. O Mg foi aplicado uma única vez, no primeiro parcelamento da adubação.

Tabela 4 - Doses de magnésio aplicadas em Mg e MgO (kg ha⁻¹) e enxofre (S) adicionado pela aplicação do sulfato de magnésio (MgSO₄) (kg ha⁻¹)

Tratamentos de Mg	Mg desejável no solo mmol _c dm ⁻³	Mg	kg ha ⁻¹			S
			MgO	MgSO ₄		
Dose 1	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Dose 2	6,0	48,6	81,0	540,0	59,4	
Dose 3	8,0	97,2	162,0	1080,0	118,8	
Dose 4	12,0	194,4	324,0	2160,0	237,6	
Dose 5	15,0	243,0	405,0	2700,0	297,0	

O sulfato de magnésio utilizado neste experimento apresentava 11% de enxofre (S). Para igualar as doses de S adicionadas foi feita aplicação de sulfato de

amônio (19% N + 24% S) e nitrato de amônio (32% N), de forma que totalizasse 260 kg ha⁻¹ de N e 297 kg ha⁻¹ de S. A adubação de N e S foi realizada em três parcelamentos iguais juntamente com os parcelamentos dos tratamentos de K.

3.3 Avaliações

3.3.1 Concentração dos teores foliares de macro e micronutrientes

A amostragem das folhas foi realizada na fase de granação. Nesta época coletaram-se seis pares de folhas do terceiro e/ou quarto nó de ramos plagiotrópicos produtivos, a meia altura da planta (RAIJ, et al. 1997).

Os materiais vegetais coletados foram secos em estufa com circulação de ar, e depois processados em moinho. Posteriormente, foram submetidos à digestão nitroperclórica para determinação das concentrações de P, K, Ca, Mg, segundo metodologia proposta por Malavolta, et al. (1997). O K foi quantificado pela fotometria de emissão de chama, enquanto que o P, Ca e Mg quantificados por espectrofotometria com plasma acoplado Perkin-Elmer Optima 5400 (ICP-OES).

3.3.2 Produtividade

A produtividade foi obtida na área útil da parcela a partir da colheita das dez plantas centrais, no momento em que a maior parte dos frutos estava no estágio cereja. Em Machado, a colheita foi realizada no dia 20/06/2014 e em Monte Santo de Minas, em 20/07/2014.

Os frutos foram colhidos por derriça manual no pano. Em seguida, procedeu-se mensuração do volume de frutos colhidos em cada parcela, denominado “café da roça”. De cada parcela retirou-se uma amostra de 5 litros, que foram secas no ambiente por, aproximadamente, duas semanas. Após secagem, pesaram-se as amostras e procedeu-se o beneficiamento, separando-as em grãos e casca. Determinou-se a massa das amostras beneficiadas, as quais foram corrigidas para a umidade equivalente a 110 g kg⁻¹ (11%). Após isso, converteram-se os valores obtidos para kg ha⁻¹ de acordo com a população de plantas das áreas experimentais, a fim de determinar a produtividade de grãos de café beneficiado.

3.3.3 Análise de solo

Após a colheita, foi realizada uma coleta de solo para análise química em cada uma das parcelas. Coletaram-se quatro amostras simples de 0-20 cm por parcela para compor uma amostra composta por parcela, na projeção dos ramos plagiotrópicos do cafeeiro, utilizando-se uma sonda de amostragem.

Para extração dos nutrientes, foi utilizado o extrator acetato de amônio ajustado a pH 7, de acordo com a metodologia descrita por Simard (1993). O objetivo desta análise de solo foi avaliar o efeito dos tratamentos nos níveis de K, Ca e Mg no solo. O K foi quantificado por fotometria de emissão de chama, enquanto que Ca e Mg foram quantificados por espectrometria de absorção atômica.

3.4 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos ao teste de homogeneidade de variâncias (PROC TRANSREG) e transformados quando necessário. Posteriormente foram encaminhados para análise de variância (PROC GLM) no programa SAS[®] (SAS INSTITUTE, 2009). Utilizou-se o teste F ($P < 0,05$) para verificar a significância das fontes de variação nos parâmetros avaliados. Quando se verificou significância realizou-se a análise de regressão das variáveis classificatórias contínuas em modelos lineares ou polinomiais de segunda ordem, com base no melhor ajuste.

4 RESULTADOS

4.1 Produtividade

Em ambos os experimentos, a produtividade não foi influenciada pela aplicação de K e/ou de Mg (Tabela 5). Apesar disto, os níveis de produtividade das duas áreas foram distintos (Tabela 5). A produtividade média em Machado (1.586,8 kg ha⁻¹) foi maior que em Monte Santo de Minas (890,4 kg ha⁻¹) de grãos beneficiados (Tabela 6).

Tabela 5 – Análise de variância conjunta entre os locais e as doses de magnésio (Mg) e potássio (K) para as variáveis: produtividade de grãos de café beneficiados (kg ha⁻¹)

Fontes de variação	Produtividade	
	Valor F	Pr>F
Bloco (Local)	2,22	0,0799 ^{ns}
Local (L)	37,24	<0,0001 ^{**}
Dose de Mg (Mg)	0,02	0,9994 ^{ns}
Dose de K (K)	0,65	0,6308 ^{ns}
Local x Mg	0,65	0,5277 ^{ns}
Local x K	2,38	0,1030 ^{ns}
Mg x K	1,02	0,4320 ^{ns}
Local x Mg x K	0,95	0,4817 ^{ns}
C.V.	45%	

^{ns} não significativo ^{**} significativo a 5% ^{***} significativo a menos de 1% de probabilidade pelo teste F

Tabela 6 – Média da produtividade de grãos de café beneficiados (kg ha⁻¹) para os locais: Machado e Monte Santo de Minas

Local	Produtividade kg ha ⁻¹
Machado	1586,8a
Monte Santo de Minas	860,4b

¹ Médias na coluna seguidas de mesma letra são iguais estatisticamente pelo teste Tukey (0,05)

4.2 Teores foliares de magnésio, potássio, cálcio e fósforo

Em relação ao teor de Mg foliar, houve efeito significativo para a dose de Mg e a para a interação entre local e dose de K (Tabela 7). A aplicação de Mg afetou os teores foliares deste elemento, independentemente da dose de K aplicada, comprovada pela ausência de interação entre dose de K e Mg (Tabela 7). A figura 3 apresenta a regressão dos valores médios de concentração Mg foliar entre os dois experimentos em função da dose de Mg. Os teores aumentaram de 2,4 g kg⁻¹ (sem aplicação de MgO) para 2,8 g kg⁻¹ na maior dose (405 kg ha⁻¹). Os teores foliares de

Mg foram mais altos em Machado (2,83 g kg⁻¹) que em Monte Santo de Minas (2,50 g kg⁻¹) (Tabela 9).

A figura 4 representa a regressão entre teor de Mg em função da dose de K₂O, em que observou interação entre Local e Dose de K na concentração de Mg foliar, o que significa que o efeito da aplicação de K variou de acordo com o experimento. Em Monte Santo de Minas, a aplicação de K não afetou a concentração foliar de Mg (Tabela 7). Em Machado, as doses mais baixas aumentaram o teor de Mg até a dose de 260 kg ha⁻¹. Contudo, na maior dose de K₂O (390 kg ha⁻¹) reduziu a concentração foliar de Mg (Figura 4).

Tabela 7 – Análise de variância para concentração foliar (g kg⁻¹) de potássio (K) e magnésio (Mg)

Fontes de variação	Mg-foliar		K-foliar	
	Valor F	Pr>F	Valor F	Pr>F
Bloco (Local)	1,66	0,0818 ^{ns}	1,11	0,3590 ^{ns}
Local (L)	22,05	<0,0001**	51,09	<0,0001*
Dose de Mg (Mg)	16,81	<0,0001**	1,18	0,3292 ^{ns}
Dose de K (K)	2,01	0,1021 ^{ns}	1,15	0,3233 ^{ns}
Local x Mg	1,50	0,0848 ^{ns}	0,42	0,7939 ^{ns}
Local x K	2,23	0,0406*	0,08	0,9259 ^{ns}
Mg x K	1,72	0,0941 ^{ns}	0,71	0,6848 ^{ns}
Local x Mg x K	0,50	0,8810 ^{ns}	2,08	0,0527 ^{ns}
C.V.		8%		15%

^{ns} não significativo ** significativo a 5% * significativo a menos de 1% de probabilidade pelo teste F

Tabela 8 – Desdobramento da interação entre Local e Dose de K (kg ha⁻¹) para concentração foliar de Mg

Local	K-foliar	
	Valor F	Pr>F
Machado	5,36	0,0075**
Monte Santo de Minas	0,42	0,6581 ^{ns}

^{ns} não significativo ** significativo a 5% * significativo a menos de 1% de probabilidade pelo teste F

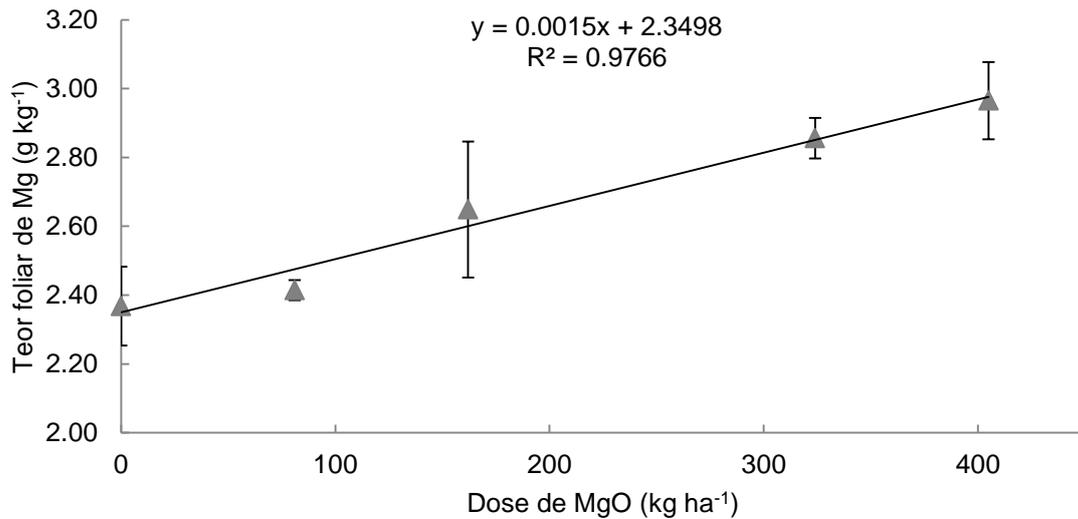


Figura 3 - Médias dos dois locais para teores Mg foliar (g kg⁻¹) em função da dose de Mg (kg ha⁻¹ MgO); ns não significativo ** significativo a 5% ** significativo a menos de 1% de probabilidade pelo teste F

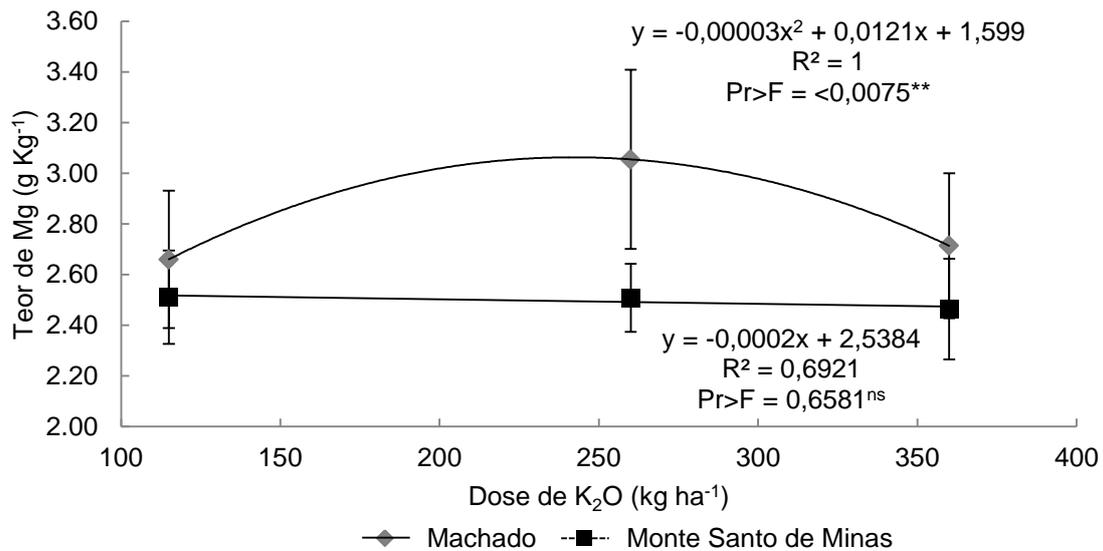


Figura 4 - Médias dos teores Mg foliar (g kg⁻¹) em função da dose de K (kg ha⁻¹ K₂O); ns não significativo ** significativo a 5% ** significativo a menos de 1% de probabilidade pelo teste F

Nos dois experimentos, a aplicação de K não afetou a concentração foliar do mesmo (Tabela 7). Os valores de K foliar foram mais altos em Machado (23,6 g kg⁻¹) do que em Monte Santo de Minas (20,9 g kg⁻¹) (Tabela 9). Também não foi observado efeito da aplicação de Mg nos teores foliares de K (Tabela 7).

Tabela 9 – Média dos teores foliares (g kg^{-1}) de potássio (K), magnésio (Mg), cálcio (Ca) e fósforo (P) no experimento em Machado (MG) e Monte Santo de Minas (MG)

Local	Mg-foliar		K-foliar		Ca-foliar		P-foliar	
	----- g kg^{-1} -----							
Machado	2,8	A ¹	23,6	A	8,9	A	1,6	A
Monte Santo de Minas	2,5	B	20,9	B	7,6	B	1,5	B

¹ Médias na coluna seguidas de mesma letra são iguais estatisticamente pelo teste tukey (0,05)

Não houve efeito dos tratamentos nos teores de Ca e P. O único efeito significativo foi para local, em que Machado apresentou concentração foliar de Ca e P mais alto do que em Monte Santo, tanto para Ca quanto para P (Tabela 10).

Tabela 10 – Análise de variância para concentração foliar (g kg^{-1}) de cálcio (Ca) e fósforo (P)

Fontes de variação	Ca-foliar		P-foliar	
	Valor F	Pr>F	Valor F	Pr>F
Bloco (Local)	1,11	0,8443 ^{ns}	0,57	0,6840 ^{ns}
Local (L)	51,09	<0,0001 ^{**}	9,65	0,0030 ^{**}
Dose de Mg (Mg)	1,18	0,2675 ^{ns}	0,56	0,6956 ^{ns}
Dose de K (K)	1,15	0,1382 ^{ns}	0,74	0,4829 ^{ns}
Local x Mg	1,01	0,4082 ^{ns}	0,37	0,8322 ^{ns}
Local x K	0,08	0,0896 ^{ns}	0,25	0,7769 ^{ns}
Mg x K	0,71	0,8786 ^{ns}	1,40	0,2150 ^{ns}
Local x Mg x K	2,08	0,8090 ^{ns}	0,85	0,5652 ^{ns}
C.V.	15%		10%	

ns não significativo ** significativo a 5% ** significativo a menos de 1% de probabilidade pelo teste F

4.3 Teores trocáveis de magnésio, potássio e cálcio no solo

Os teores trocáveis de Mg desejados correlacionaram de forma linear e positiva com os teores obtidos pela análise química, com coeficiente de determinação (R^2 0,907) em Machado e (R^2 0,719) para Monte Santo de Minas (Figura 5).

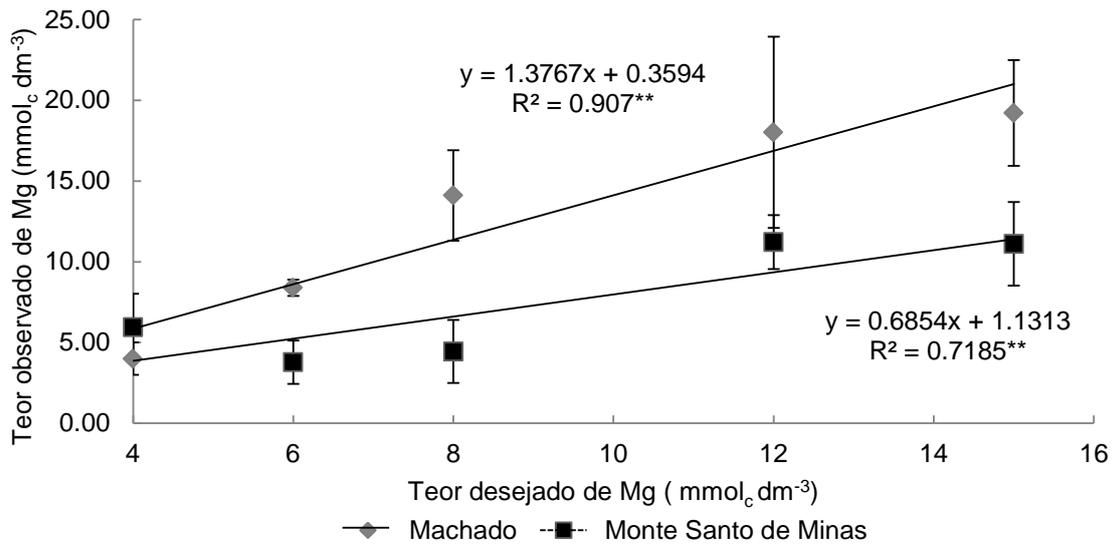


Figura 5 – Correlação entre o teor de Mg (mmol_c dm⁻³) desejado e teor de Mg obtido pela análise química (mmol_c dm⁻³)

A aplicação de Mg alterou de forma distinta os teores de Mg trocáveis no solo dos experimentos (Tabela 11). O desdobramento da interação entre Local e Dose de Mg está representada na tabela 12. Os teores trocáveis de Mg aumentaram de forma linear em ambos os locais, embora mais acentuado em Machado (Figura 6). Neste experimento, o teor de Mg trocável aumentou em 70% em Machado e 45% em Monte Santo de Minas na dose máxima (405 kg ha⁻¹ MgO). Nestes locais, a aplicação de K não alterou o teor de Mg trocável (Tabela 11 e figura 6).

Tabela 11 – Análise de variância para teor trocável (mmol_c dm⁻³) de potássio (K), magnésio (Mg), cálcio (Ca)

Fontes de variação	Mg-trocável		K-trocável		Ca-trocável	
	Valor F	Pr>F	Valor F	Pr>F	Valor F	Pr>F
Bloco (Local)	0,60	0,6640 ^{ns}	0,31	0,8677 ^{ns}	0,11	0,9797 ^{ns}
Local (L)	60,93	<0,0001 ^{**}	1257,27	<0,0001 ^{**}	23,42	<0,0001 ^{**}
Dose de Mg (Mg)	18,26	<0,0001 ^{**}	3,75	0,0092 ^{**}	0,85	0,4991 ^{ns}
Dose de K (K)	1,17	0,3194 ^{ns}	50,85	<0,0001 ^{**}	2,05	0,1376 ^{ns}
Local x Mg	7,11	<0,0001 ^{**}	5,63	0,0007 ^{**}	0,89	0,0737 ^{ns}
Local x K	1,59	0,2154 ^{ns}	13,04	<0,0001 ^{**}	0,89	0,4149 ^{ns}
Mg x K	1,37	0,2345 ^{ns}	1,02	0,4293 ^{ns}	1,32	0,2527 ^{ns}
L x Mg x K	1,15	0,3511 ^{ns}	1,67	0,1277 ^{ns}	0,84	0,5745 ^{ns}
C.V.	43%		19%		49%	

ns não significativo ** significativo a 5% ** significativo a menos de 1% de probabilidade pelo teste F

Tabela 12 – Desdobramento da interação entre Local e Dose de Mg (kg ha^{-1}) para teor de Mg e K trocável ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$)

Local	Mg-trocável		K-trocável	
	Valor F	Pr>F	Valor F	Pr>F
Machado	25,42	<0,0001**	2,74	0,0744ns
Monte Santo de Minas	2,97	0,0284*	0,40	0,6725 ^{ns}

ns não significativo ** significativo a 5% ** significativo a menos de 1% de probabilidade pelo teste F

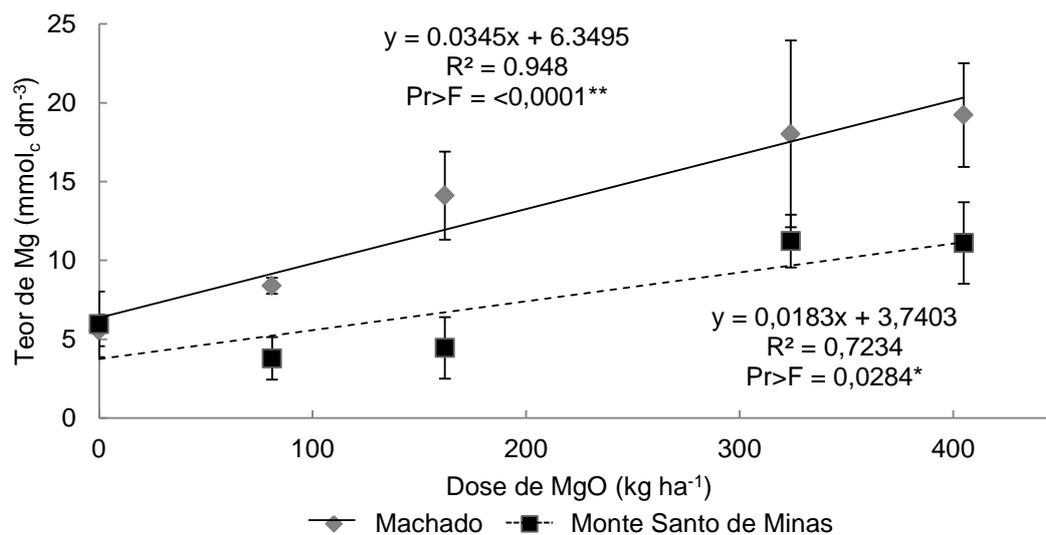


Figura 6 - Teores trocável de Mg ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) para os experimentos de Machado e Monte Santo de Minas em função da dose de Mg (kg ha^{-1} MgO); ns não significativo ** significativo a 5% ** significativo a menos de 1% de probabilidade pelo teste F

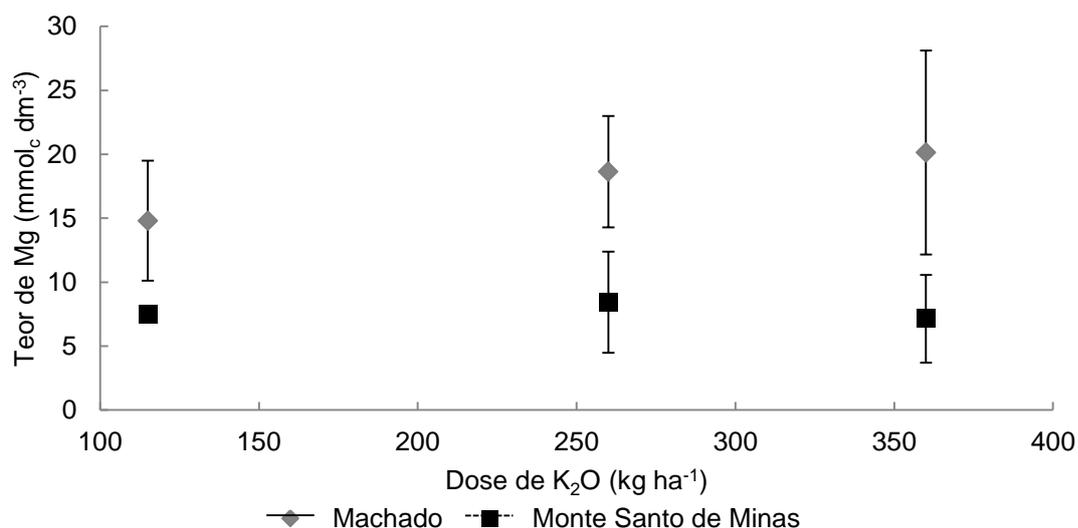


Figura 6 - Teores trocável de Mg ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) para os experimentos de Machado e Monte Santo de Minas em função da dose de K (kg ha^{-1} K₂O).

Todavia, a aplicação de Mg influenciou significativamente os teores de K trocável. Este efeito foi distinto nas duas áreas, uma vez que foi verificada interação significativa entre Local e Dose de K (Tabela 11). Em Monte Santo de Minas, o fornecimento de Mg aumentou a quantidade de K trocável. Em Machado, as doses mais baixas de Mg (até 162 kg ha⁻¹ MgO) aumentaram a quantidade de K trocável, enquanto que as doses mais altas (324 e 405 kg ha⁻¹ MgO) reduziram 13% e 30%, nessa ordem. Apesar disto, o teor médio de K no solo em Machado (10,16 mmol_c dm⁻³) foi superior ao de Monte Santo de Minas (2,18 mmol_c dm⁻³). O desdobramento da interação entre local e dose de K está presente na tabela 13.

Tabela 13 – Desdobramento da interação entre Local e Dose de K (kg ha⁻¹) para teores de Mg e de K trocável no solo.

Local	Mg-trocável		K-trocável	
	Valor F	Pr>F	Valor F	Pr>F
Machado	3,51	0,0128*	58,92	<0,0001**
Monte Santo de Minas	5,70	0,0007**	6,39	0,0033**

^{ns} não significativo ** significativo a 5% ** significativo a menos de 1% de probabilidade pelo teste F.

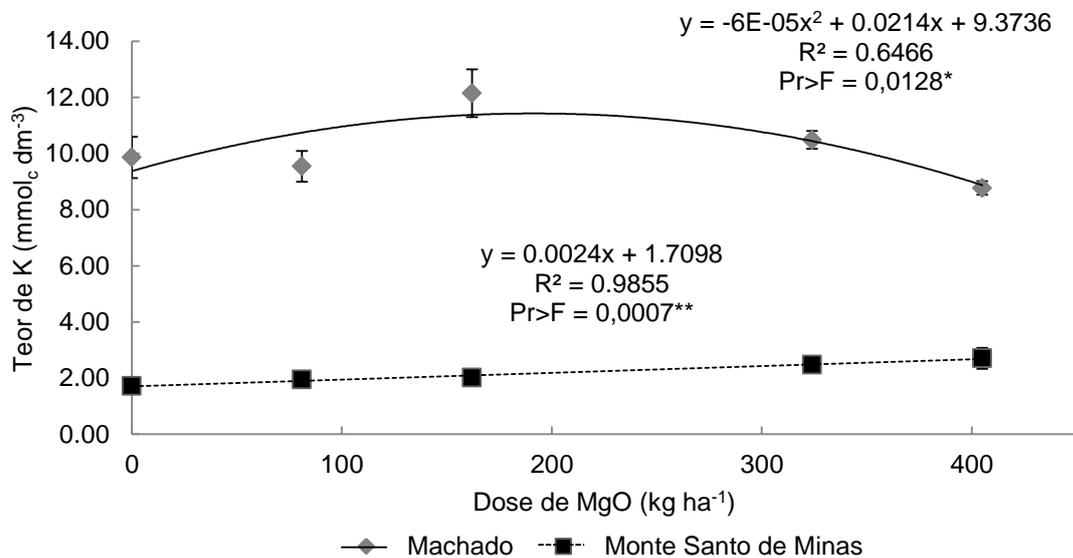


Figura 7 - Teores trocável de K (mmol_c dm⁻³) para os experimentos de Machado e Monte Santo de Minas em função da dose de Mg (kg ha⁻¹ MgO); ns não significativo ** significativo a 5% ** significativo a menos de 1% de probabilidade pelo teste F

A aplicação com K alterou de forma distinta os teores de K trocáveis no solo nos dois experimentos (Tabela 11). O aumento dos teores de K em função da dose de K ocorreu de forma linear nos dois locais. Entretanto, o aumento de K em Machado foi mais acentuado (105%) que em Monte Santo (32%) pela aplicação de 390 kg ha⁻¹ K₂O.

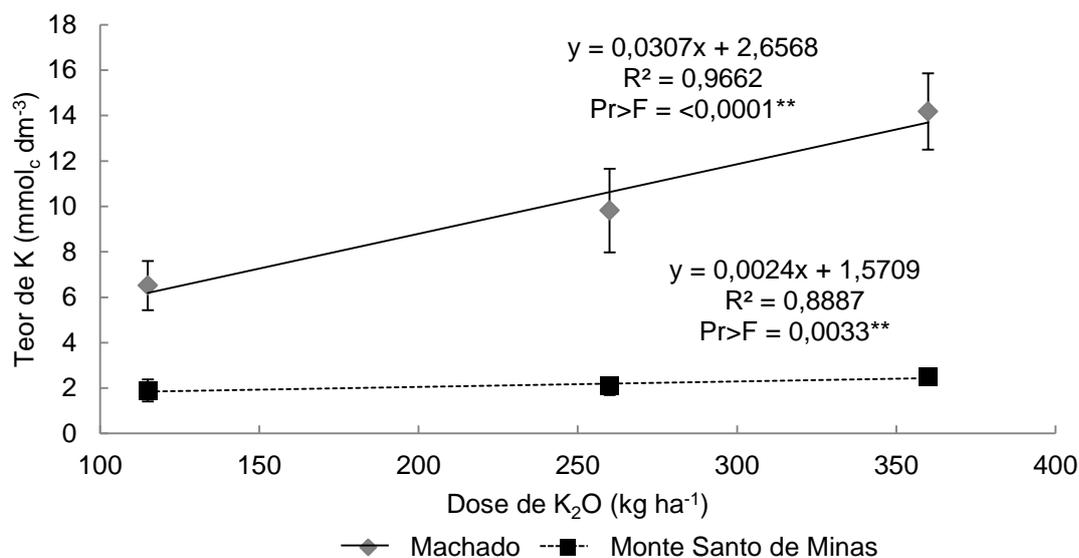


Figura 8 - Teor trocável de K ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$) nos experimentos de Machado e Monte Santo de Minas em função da dose de Mg (kg ha^{-1} MgO); ns não significativo ** significativo a 5% ** significativo a menos de 1% de probabilidade pelo teste F

Em ambos os experimentos, a aplicação de K ou de Mg não afetou significativamente os teores de Ca trocável. Entretanto, os teores de Ca ao final do experimento foram distintos nos dois locais (Tabela 14) com $13,4 \text{ mmol}_c \text{dm}^{-3}$ em Machado e $8,2 \text{ mmol}_c \text{dm}^{-3}$ em Monte Santo de Minas.

Tabela 14 – Média do teor de Ca-trocável ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$) para Machado e Monte Santo de Minas.

Local	Ca-trocável $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$
Machado	13,4a
Monte Santo de Minas	8,2b

¹ Médias na coluna seguidas de mesma letra são iguais estatisticamente pelo teste tukey (0,05)

5 DISCUSSÃO

Os teores de Mg do solo (Tabela 4) correlacionaram com as doses aplicadas do nutriente, ao término do experimento (Figura 5). Em Machado, o coeficiente de determinação (R^2) foi igual a 0,907, que evidencia resposta direta às doses de Mg. Em Monte Santo de Minas, o coeficiente de determinação foi menor ($R^2 = 0,719$). A diferença de comportamento entre as classes de solos decorre, principalmente, da textura da camada superficial do argilossolo em Monte Santo de Minas, o qual tem 165 g kg^{-1} de argila, comparado a 707 g kg^{-1} em Machado (Tabela 2).

A análise de solo ao fim do experimento evidenciou que os teores de Mg no solo aumentaram de forma linear em função da dose de Mg, nos dois experimentos (Figura 6). O teor de Mg aumentou em 70% em Machado, quando foi aplicada a maior dose ($405 \text{ kg ha}^{-1} \text{ MgO}$), enquanto na área de Monte Santo, para a mesma dose, o Mg trocável aumentou 50%.

A textura do solo relaciona diretamente com a capacidade de troca de cátions (CTC) (BOHN et al. 2002), equivalente a $55 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ em Monte Santo e $83 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ em Machado. A lixiviação de cátions está diretamente ligada à relação entre o seu teor na solução do solo e o seu teor no complexo de troca. A CTC é o parâmetro que mais interfere nesta relação, uma vez que quanto menor a CTC, maior a quantidade do elemento livre na solução do solo, e maior sua predisposição para lixiviar (MIELNICZUK, et al. 1982, WERLE et al., 2008). No caso do solo de Monte Santo Minas, provavelmente uma grande parte do Mg aplicado lixiviou em decorrência das chuvas, intensas em dezembro/2013 e abril/2014 (Figura 2). Em Machado, a maior disponibilidade de cargas no complexo de troca favoreceu a adsorção do Mg aplicado, com acúmulo no complexo de troca. O mesmo comportamento foi observado para o K, que também acumulou mais em Machado, em relação a Monte Santo (Figura 8). A dificuldade de aumentar o teor de Mg em Monte Santo decorre, portanto, do maior potencial de lixiviação de bases, em razão da baixa CTC do solo dessa área.

Tanto o K quanto o Mg são macronutrientes e desempenham funções importantes no transporte de carboidratos das folhas para órgãos dreno. Contudo, não se verificou efeito da aplicação de K e/ou de Mg na produtividade do cafeeiro nas áreas experimentais (Tabela 5). O cafeeiro a pleno sol, por frutificar apenas na parte de ramos formados na estação anterior, apresenta uma produção bienal, intercalando safras altas e baixas (DA MATTA et al., 2007). Em razão disto, a

avaliação da produtividade depende de ao menos dois ciclos, o que não aconteceu na presente pesquisa. A produtividade das áreas experimentais foi relativamente baixa, com 1.568,8 kg ha⁻¹ em Machado e 890,5 kg ha⁻¹ em Monte Santo, típico de safra baixa. Ademais, o coeficiente de variação foi muito alto (45%), comum em cafezal estressado após a safra alta, como aconteceu às lavouras desta pesquisa (Tabela 5).

Além da bienalidade de produção, ocorreu um veranico acentuado na região onde localizavam as áreas experimentais (Figuras 1 e 2) que afetou a produtividade do cafeeiro. Em Machado, a precipitação acumulada nos três primeiros meses de 2014 foi 60% abaixo da média da normal climatológica. Em Monte Santo de Minas, a precipitação acumulada nos três primeiros meses de 2014 foi 50% abaixo da média da normal climatológica.

A escassez de chuva aumentou a temperatura média do ar (Figuras 1 e 2) em razão da maior exposição à radiação solar, e causou dano fotooxidativo nas folhas do cafeeiro. A deficiência de Mg favorece o aparecimento de espécies reativas de oxigênio, cuja produção é intensificada sob alta radiação solar (CAKMAK; KYRKBY, 2007), como fora observado nos primeiros meses de 2014.

No cafeeiro, a deficiência de Mg reduz a relação raiz/parte aérea, por causa do acúmulo de carboidratos nas folhas, que por sua vez aumenta as espécies reativas de oxigênio, danificando células (SILVA et al., 2014). A resposta ao fornecimento de Mg deveria ser mais acentuada, em razão dos acontecimentos, mas não foi o observado (Figuras 1 e 2).

O fornecimento de Mg aumentou linearmente sua concentração foliar, em ambos os experimentos, independentemente da dose de K (Figura 3). Todavia, a concentração foliar de Mg somente atingiu a faixa de suficiência (3,0 a 5,0 g kg⁻¹; RAIJ et al. 1997) quando se aplicou a maior dose 405 kg ha⁻¹ de MgO. Nas demais, a concentração foliar ficou abaixo do limite inferior da faixa de suficiência.

Nos dois experimentos, os teores trocáveis de Mg estavam na classe de teor alto, acima de 8 mmol_c dm⁻³, recomendado ao cafeeiro (RAIJ et al. 1997). Ainda assim, as concentrações foliares não alcançaram o limite inferior da faixa de suficiência (3,0 a 5,0 g kg⁻¹), consequência do déficit hídrico acontecido durante a formação da folha diagnóstica. Quando utilizou 405 kg ha⁻¹ de MgO atingiu-se o nível de suficiência de Mg foliar, e os teores trocáveis foram iguais a 19 mmol_c dm⁻³ em Machado e 11 mmol_c dm⁻³ em Monte Santo. Esses valores correspondem a 22% e

20% da CTC ocupada por Mg trocável, em Machado e Monte Santo de Minas, nessa ordem. Observa-se que em ambas as áreas, a aplicação de Mg na dose máxima (405 Kg ha^{-1}) elevou a saturação por Mg a 20%, valor superior à recomendação de 6% a 12% (MALAVOLTA; MOREIRA, 1993).

Para o teor de Mg, não observou interação entre a aplicação de K e Mg. A aplicação de K afetou diferentemente as concentrações foliares de Mg nos dois experimentos (Tabela 7). Em Monte Santo, a aplicação de K não alterou a concentração de Mg foliar (Figura 4), enquanto em Machado, a concentração de Mg aumentou até dose de 260 kg ha^{-1} e reduziu a partir desta dose de K.

O K interfere na absorção de Mg por meio de dois mecanismos distintos e antagônicos (SEGGEWEISS; JUNGK; 1988). O primeiro mecanismo é consequência da troca de cátions no solo, pois a adubação potássica altera o equilíbrio entre o complexo de troca e a solução do solo, aumentando a disponibilidade de Mg às raízes. Este efeito explica o aumento da concentração foliar de Mg, sob baixa dose de K, como no experimento em Machado (Figura 4). O segundo mecanismo está relacionado à absorção propriamente dita, em que a entrada de Mg é inibida pela presença de K em alta concentração na solução do solo. Este efeito foi observado em Machado, na aplicação de altas doses de K, onde ocorreu redução na concentração foliar de Mg (Figura 4). A redução dos teores de Mg em função da aplicação de K é denominada deficiência induzida (METSON et al., 1974). Em experimentos em solução nutritiva, onde os nutrientes estão prontamente disponíveis, a presença de níveis elevados de K diminui drasticamente a absorção de Mg (FONSECA; MEURER, 1997; HEENAN; CAMPBELL, 1981; HAWKESFORD et al., 2012).

As causas da interação entre K e Mg ainda não foram completamente elucidadas pela ciência (GRANSEE; FÜHRS, 2012). Uma das teorias pressupõe que o somatório de cátions absorvidos varia pouco, mesmo quando altera a dose fornecida de determinado nutriente isolado (MENGEL; KIRKBY, 2001). Nesse caso, quando há predominância de um cátion no solo, este elemento é preferencialmente absorvido, o que reduz diretamente a absorção dos demais. Outra teoria, tem como premissa que o Mg e K são absorvidos pelos mesmos transportadores de membrana, e o K teria a preferência por apresentar um menor raio hidratado (GRANSEE; FÜHRS, 2012). No solo, os efeitos da interação são ainda mais difíceis

de serem previstos, em razão da interação desses nutrientes com o complexo de troca.

O solo de Monte Santo possui uma CTC menor, e a aplicação de K modificou relativamente pouco os teores trocáveis desse nutriente (Figura 7). Como esse solo possui uma menor quantidade de cargas, era esperado que o K ficasse em maior quantidade na solução, favorecendo sua absorção em detrimento da de Mg. Entretanto, não houve efeito da aplicação de K na concentração foliar de Mg. A inibição da absorção do Mg pelo K está relacionada com a depleção do K do solo e a capacidade do solo em repor o nutriente por difusão (SEGGEWEISS; JUNGK; 1988). No caso do solo de Monte Santo, a menor CTC pode fazer com que a depleção de K nas proximidades das raízes seja mais acentuada, e assim minimiza o efeito da interação entre o K e o Mg.

6 CONCLUSÕES

No Argissolo, a lixiviação de K, independentemente da dose, impede a redução da concentração foliar de Mg. No Latossolo, a concentração de Mg foliar varia com a dose de K e apresenta ajuste quadrático.

A concentração foliar de Mg aumenta linearmente com a dose do nutriente, independentemente da classe de solo e da dose de K aplicada.

REFERÊNCIAS

BOHN, H.L.; MYER, R.A.; O'CONNOR, G.A. **Soil chemistry**. New York: John Wiley , 1995. 267p.

BOYER, J. **Le calcium et le magnésium dans les sols des régions tropicales humides et sub-humides**. Paris: ORSTOM, 1978. 173p.

BRITTO, D.T.; KRONZUCKER, H.J. Cellular mechanisms of potassium transport in plants. **Physiol Plant**, Copenhagen, v. 133, n. 4, p. 637-650, 2008.

BRICEÑO, J.A.; CARVAJAL, J.A. El equilibrio entre los metales alcalinos y alcalinotérreos en el suelo, asociado con la respuesta del cafeto al potássio. **Boletín para Bibliotecas Agrícolas**, Turrialba, v. 23, n 1, p. 56-71, 1973.

CARVAJAL, J.F. **Cafeto: Cultivo y fertilización**. 2 ed, Berna: Instituto Internacional de la Potassa, 1984. 254p.

CAI, J.; CHEN, L.; QU, H.; LIAN, J.; LIU, W.; HU, Y.; XU, G. Alteration of nutrient allocation and transporter genes expression in rice under N, P, K, and Mg deficiencies. **Acta Physiologiae Plantarum**, Varsovia, v. 34, n. 3, p. 939-946, 2012

CORREA, J. B. Extração de nutrientes pelos cafeeiros Mundo Novo e Catuaí. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 12., 1985, Caxambu. **Anais...** Rio de Janeiro:IBC, 1985. p. 61-66.

CAKMAK, I.; HENGELER, C.; MARSCHNER, H. Changes in phloem export of sucrose in leaves in response to phosphorus, potassium and magnesium deficiency in bean plants. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.45, n.9, p. 1251-1257, 1994.

CAKMAK, I.; KIRBY, E. A. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 133, n. 4, p. 692-704, 2008.

GARCIA, A.W.R.; VIANA, A.S. Estudo das fontes e doses de magnésio no plantio e condução do cafeeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 12., 1985, Caxambu. **Anais...** Rio de Janeiro:IBC, 1985. p. 155-158.

DECHEN A.R.; NACHTIGALL G.R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS R.F.; ALVAREZ V.V.H.; BARROS N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: SBCS; UFV, 2007. p. 92-132.

DAMATTA, F. M.; RONCHI, C. P.; MAESTRI, M.; BARROS, R. S.. Ecophysiology of coffee growth and production. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina , v. 19, n. 4, p. 485-510, Dec. 2007.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.

EPSTEIN E.; RAINS, D.W.; ELZAM, O.E. Resolution of dual mechanisms of potassium absorption by barley roots. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 49, n. 5, p. 684-692, 1963.

FAGERIA, N.K. Absorption of magnesium and its influence on the uptake of phosphorus, potassium, and calcium by intact groundnut plants. **Plant and Soil**, The Hague, v. 40, n. 2, p. 313-320, 1974.

FONSECA J.A; MEURER, E.J. Inibição da absorção de magnésio pelo potássio em plântulas de milho em solução nutritiva. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n. 47, 1997.

FORESTIER, J. Potassium and the Robusta coffee tree. **Fertilité**, Paris, v.30, n.10 p. 3-63, 1968.

FINK, S. The micromorphological distribution of bound calcium in needles of Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.]. **New Phytologist**, London, v. 119, n. 1, p. 33-40, 1991.

GARCIA, A L.A.; CARVALHO, C. H. S.; GARCIA, A. W. R. Extração de nutrientes em cafeeiros da espécie *Coffea arabica* L. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 34., 2008, Brasília. **Anais...** Brasília, DF: Embrapa Café, 2009. p. 53 -55.

GRANSEE, A.; FÜHRS, H. Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. **Plant and Soil**, The Hague, v. 368, n. 1, p. 5-21, 2013.

HAWKESFORD, M.; HORST, W.; KICHEY, T.; LAMBERS, H.; SCHJOERRING, J.; I. S. MØLLER; WHITE P. Functions of macronutrients. In: MARSCHNER, H. (Ed.). **Mineral nutrition of higher plants**. 3rd ed. San Diego: Academic Press, 2012. p. 135-189.

HEENAN, D.P.; CAMPBELL, L.C. Influence of potassium and manganese on growth and uptake of magnesium by soybeans (*Glycine max* (L.) Merr. cv. Bragg); **Plant and Soil**, The Hague, v 61, n. 3, p. 447-456, 1981.

HERMANS, C.; BOURGIS, F.; FAUCHER, M.; DELROT, S; STRASSER, R.J.; VERBRUGGEN, N. Magnesium deficiency in sugar beet alters sugar partitioning and phloem loading in young mature leaves. **Planta**, Berlin, v. 220, n. 4, p. 541–549, 2005.

INMET. **Normais climatológicas do Brasil -1961-1990**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>. Acesso em: 9 nov. 2015.

- KOPITTKE, P.M.; MENZIES, N.W. A review of the use of the basic cation saturation ratio and the "ideal" soil. **Science Society of America Journal**, Madson, v. 71, n. 2, p. 259-265, 2007.
- KÖPPEN, W. Das geographische system der climate. In: KÖPPEN, W; EIGER, R. (Eds.). **Handbuch der Klimatologie**. Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1936. p. 1-44.
- LAVIOLA, B.G.; MARTINEZ, H.E.; SALOMÃO, L.C.C.; CRUZ, C.D.; MENDONÇA, S.M. Acúmulo de nutrientes em frutos de cafeeiro em quatro altitudes de cultivo: cálcio, magnésio e enxofre. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1451-1462, 2007.
- MAATHUIS, J.M.; PODAR, D. Uptake, Distribution, and Physiological Functions of Potassium, Calcium, and Magnesium. In: HAWKESFORD, M.J.; BARRACLOUGH, P. **The Molecular and Physiological Basis of Nutrient Use Efficiency in Crops**. 3rd ed. Chichester: Wiley-Blackwell, 2011. p. 265-295.
- MAGUIRE, M.E.; COWAN, J. Magnesium chemistry and biochemistry. **BioMetals**, Dordrecht, v. 15, n.3, p. 203–210, 2002.
- MALAVOLTA, E.; MOREIRA, A. Nutrição e adubação do cafeeiro adensado. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, POTAFÓS, n.80. p.1-8, 1997.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e avaliações**. 2 ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa do fosfato, 1997. 238p.
- MALAVOLTA, E.; FAVARIN, J.L.; MALAVOLTA, M.; CABRAL, C.P.; HEINRICH, R.; SILVEIRA, J.S.M. Repartição de nutrientes nos ramos, folhas e flores do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 7, p. 1017-1022, 2002.
- MARSCHNER, H.; KIRKBY E.; ÇAKMAK, I. Effect of mineral nutritional status on shoot-root partitioning of photoassimilates and cycling of mineral nutrients. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 47, edição especial, p. 1255-1263, 1996.
- MARTINEZ, H. E. P.; MENEZES, J. F S.; SOUZA, R. B de; VENEGAS, V. H. A. e GUIMARÃES, P. T. G. Faixas críticas de concentrações de nutrientes e avaliação do estado nutricional de cafeeiros em quatro regiões de Minas Gerais. **Pesquisa agropecuária brasileira**. Brasília, v. 38, n. 6, p. 703-713, jun. 2003
- MELO, V.F.; RIBEIRO, A.N.; MASCHIO, P.A.; CORRÊA, G.F.; LIMA, V.C. Mineralogia e formas de potássio e magnésio em diferentes classes de pesos e tamanhos da fração areia de solos do Triângulo Mineiro. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa , v. 28, n. 2, p. 219-231, 2004.
- MELO, V.F.; CORREA, G.F.; RIBEIRO, A.N.; MASCHIO, P.A. Cinética de liberação de potássio e magnésio pelos minerais da fração argila de solos do Triângulo Mineiro. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.29, n.4, p. 533-545, 2005.

METSON, A.J.I. Some factors governing the availability of soil magnesium: A review. **New Zealand Journal of Experimental Agriculture.**, Wellington, v. 2, n. 3, p. 277-319, 1974.

MIELNICKZUK, J. Avaliação da resposta das culturas ao potássio em ensaios de longa duração: Experiências brasileiras. In: YAMADA, T.; MUZZILLI, O. USHERWOOD, N.R., eds. **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba, Instituto da Potassa e Fosfato, 1982. p.289-303.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420p.

RAIJ, B van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1997. 285p. (IAC. Boletim Técnico, 100).

ROBSON, A.D.; PITMAN, M.G. **Interactions between nutrients in higher plants**. In: Inorganic plant nutrition. Springer Berlin Heidelberg, 1983. p. 147-180.

SAS INSTITUTE. **The SAS system for Windows**: v. 9.2. Cary, 2009.

SCOTT, B.J.; ROBSON, A.D. Distribution of magnesium in subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L.) in relation to supply. **Crop Pasture Sci**, Collingwood, v. 41, n. 3, p. 499-510, 1990.

SEGGEWISS, B.; JUNGK, A.. Influence of potassium dynamics at the soil-root interface on magnesium uptake of plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 151, n. 2, p.91-96, 1988.

SHABALA, S.; HARIADI, Y.. Effects of magnesium availability on the activity of plasma membrane ion transporters and light-induced responses from broad bean leaf mesophyll. **Planta**, Berlin, v. 221, n. 1, p. 56-65, 2005.

SHAUL, O. Magnesium transport and function in plants: the tip of the iceberg. **Biometals**, Dordrecht, v. 15, n. 3, p. 307-321, 2002.

SIMARD, R.R. Ammonium Acetate.-Extractable Elements. In: CARTER, M.R. (Ed.). **Soil Sampling and Methods of Analysis**. Boca Raton, Lewis Publishers.1993. p. 39-42.

SILVA, D. M.; BRANDÃO, I. R.; ALVES, J. D.; SANTOS, M. O.; SOUZA, K. R. D.; SILVEIRA, H. R. O. de.. Physiological and biochemical impacts of magnesium-deficiency in two cultivars of coffee. **Plant and Soil**, The Hague, v. 328, n. 2, p. 133-150, Sept. 2014.

WALKER, C.J.; WEINSTEIN, J.D. Further Characterization of the Magnesium Chelatase in Isolated Developing Cucumber Chloroplasts Substrate Specificity, Regulation, Intactness, and ATP Requirements. **Plant Physiology**, Lancaster, v. 95, n. 4, p. 1189-1196, 1991.

WERLE, R.; GARCIA, A.R. & ROSOLEM, C.A. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2297-2305, Dec. 2008.