



RAUL MAGALHÃES FERRAZ

**APLICAÇÃO DE GESSO EM LAVOURA CAFEEIRA E
EFICIÊNCIA PARA O CULTIVO DE FEIJOEIRO:
DISTRIBUIÇÃO DE ÍONS NO PERFIL E ESPECIAÇÃO NA
SOLUÇÃO DO SOLO**

**LAVRAS-MG
2022**

RAUL MAGALHÃES FERRAZ

**APLICAÇÃO DE GESSO EM LAVOURA CAFEIEIRA E EFICIÊNCIA PARA O
CULTIVO DE FEIJOEIRO: DISTRIBUIÇÃO DE ÍONS NO PERFIL E ESPECIAÇÃO
NA SOLUÇÃO DO SOLO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Doutor.

**Prof. Dr. Guilherme Lopes
Orientador**

**LAVRAS – MG
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Ferraz, Raul Magalhães.

Aplicação de gesso em lavoura cafeeira e eficiência para o cultivo de feijoeiro: distribuição de íons no perfil e especiação na solução do solo / Raul Magalhães Ferraz. - 2022.

109 p.

Orientador(a): Guilherme Lopes.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2022.
Bibliografia.

1. Gesso agrícola. 2. Colunas de lixiviação. 3. Feijoeiro. I. Lopes, Guilherme. II. Título.

RAUL MAGALHÃES FERRAZ

**APLICAÇÃO DE GESSO EM LAVOURA CAFEIEIRA E EFICIÊNCIA PARA O
CULTIVO DE FEIJOEIRO: DISTRIBUIÇÃO DE ÍONS NO PERFIL E ESPECIAÇÃO
NA SOLUÇÃO DO SOLO**

**APPLICATION OF GYPSUM IN COFFEE CROP AND EFFICIENCY FOR
COMMON BEAN CULTIVATION: ION DISTRIBUTION IN SOIL PROFILE AND
SPECIATION OF SOIL SOLUTION**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 27 de janeiro de 2022.

Dr. Douglas Ramos Guelfi Silva	UFLA
Dr. Fábio Aurélio Dias Martins	EPAMIG
Dr. José Maria de Lima	UFRB
Dr. Milson Evaldo Serafim	IFMT

Prof. Dr. Guilherme Lopes
Orientador

**LAVRAS – MG
2022**

A Deus.

Aos meus pais Maécio Ferraz e Valduina Magalhães.

À minha amada esposa Mayara e meu filho Murilo.

Aos meus irmãos Rael e Raiy.

Aos meus compadres Mauro e Gabriela e meu afilhado João Gabriel.

A todos os meus professores.

Aos meus amigos da república.

Aos meus companheiros de Laboratório.

Aos técnicos em laboratório do DCS.

A toda minha família e amigos.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela força e coragem para vencer cada obstáculo que encontrei nessa longa caminhada até aqui.

À minha esposa Mayara, pelo amor, carinho, compreensão e cumplicidade.

Ao meu filho Murilo, pela alegria proporcionada ao longo da jornada.

Aos meus pais Maelcio e Valduina, pela boa educação e incentivo aos estudos, e meus irmãos Rael e Raiy, pela amizade e carinho.

Aos meus compadres Mauro e Gabriela e meu afilhado Joao Gabriel pela amizade e carinho.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Ciência do Solo (DCS), pela oportunidade de cursar o mestrado, e ao Departamento de Entomologia da UFLA, pela liberação e apoio no decorrer do curso.

À FAPEMIG, CAPES e CNPq, pelos recursos destinados à execução do projeto.

Ao meu orientador, professor Guilherme Lopes, pelos ensinamentos, confiança, dedicação, paciência, amizade e profissionalismo.

A todos os professores do DCS que contribuíram com seus ensinamentos para minha formação profissional e pessoal.

Aos membros, Douglas Ramos Guelfi Silva, Fábio Aurélio Dias Martins, José Maria de Lima e Milson Evaldo Serafim por participarem da banca de defesa.

Aos amigos e estagiários Luiz Gustavo e Matheus e a todos os estagiários do DCS que participaram deste trabalho.

Aos funcionários do DCS: João, Carlos, Roberto, Jean, Lívia, Geila, Dirce, Dulce, Bethânia, Pezão e a todos que contribuíram para a realização deste trabalho,

MUITO OBRIGADO!

RESUMO

A agricultura brasileira avançou para as áreas de cerrado, onde há predominância de Latossolos. Solos que possuem baixa fertilidade natural e elevada acidez, porém, apresentam alto potencial agrícola em razão das características físicas adequadas para a mecanização. O uso de gesso agrícola vem apresentando bons resultados, na correção da acidez e disponibilidade de nutrientes em profundidade. Os objetivos foram: i) avaliar a mobilidade e o efeito de doses crescentes de gesso sobre o pH, a condutividade elétrica (CE) e os teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e enxofre (S), no efluente coletado em colunas de lixiviação; ii) avaliar a disponibilidade de Ca, Mg, K e S em amostras de solos, em colunas de até 100 cm; iii) avaliar o efeito das doses de gesso no cultivo de feijoeiro e iv) avaliar a especiação iônica da solução do solo em perfil do solo em área de lavoura cafeeira 76 meses após a aplicação de altas doses de gesso. Parte do trabalho foi realizado em casa de vegetação, onde amostras de um Latossolo foram empacotadas em colunas com 10, 20, 40, 60 e 100 cm de profundidade. Na superfície dessas colunas, aplicaram-se doses de gesso equivalentes a 0, 1,5, 3, 7, 11 e 15 t ha⁻¹. Foram realizadas 15 coletas, onde foram analisados a CE, pH e os teores de Ca, Mg, K e S. Ao final das lixiviações, os mesmos elementos foram avaliados no solo e foi, então, cultivado feijoeiro. Foi avaliada a produção de matéria seca e o estado nutricional da parte aérea e dos grãos, bem como a distribuição de raízes. Já o estudo em área de cafeeiro foi conduzido em lavoura cafeeira, cultivada em 4 doses de gesso (0, 7, 14 e 56 t ha⁻¹). Amostras de solo foram coletadas aos 76 meses após a aplicação dos tratamentos, nas seguintes profundidades: 15-25, 35-45, 75-85, 125-135, 165-185, 225-245. Foram extraídas as soluções do solo, nas quais se avaliou a especiação química de Ca, Mg, K e sulfato. Nas colunas, a CE diminuiu com o aumento de água acumulada aplicada e os valores de pH não foram influenciados. Os teores de Ca e S aumentaram em toda a extensão da coluna, à medida em que se aumentaram as doses de gesso, até próximo de 60 cm. O Mg foi o cátion mais lixiviado com aumento das doses de gesso. O K foi lixiviado até 100 cm. Os teores disponíveis de Ca, Mg, K e SO₄²⁻ aumentaram nas camadas mais profundas, de acordo com as doses. Os teores de Ca e S, tanto na parte aérea quanto nos grãos do feijoeiro, foram maiores, com o aumento da dose aplicada, enquanto que os teores de Mg e K diminuiram. A produção de matéria seca da parte aérea do feijoeiro apresentou comportamento quadrático, aumentando até a dose de 10,48 t ha⁻¹. A produtividade do feijoeiro aumentou de forma linear até a dose de 15 t ha⁻¹. A maior parte dos elementos avaliados no estudo em campo se encontra-se livre na solução.

Palavras-chave: gesso agrícola, condicionador de solo, lixiviação, balanço de nutrientes, eficiência agronômica, crescimento radicular.

ABSTRACT

Brazilian agriculture has advanced to the thick areas, where Latosols predominate. Soils that have low natural fertility and high fertility, however, have a high degree of fertility with the physical characteristics suitable for mechanization. The use of agriculture has been showing good results, in the precision of the accuracy and availability of nutrients in depth. They were: i) to evaluate the mobility and effects of increasing gypsum on pH, calcium conductivity (EC) and calcium (Ca), magnesium (Mg), potassium (K) and sulfur (S) in the effluent collected in leaching columns; ii) evaluate the availability of Ca, Mg, K and S in soil samples, in a column of up to 100 cm; iii) to evaluate the effect of gypsum doses on bean cultivation and iv) to evaluate an ionic specification of the soil solution in a soil profile in a coffee plantation area 76 months after the application of high application rates. Part of the work carried out in a forest house, where it was demonstrated in a Latosol prepared in columns with 10, 2, 40, 60 and 100 cm in depth. On the nearby surface, doses of gypsum equivalent to 0, 1.5, 3, 7, 11 and 15 t ha⁻¹ will be applied. Five collections were carried out, where EC, pH and Ca, Mg, K and S contents were analyzed. At the end of the leaching, the same elements were not found alone and bean was then cultivated. The nutritional status of shoots and grains, as well as root distribution. The study in a coffee area was carried out in a coffee plantation, cultivated in 4 doses of gypsum (0, 7, 14 and 56 t ha⁻¹). Soil samples were collected at 76 months after treatment application, at the following depths: 15-25, 35-45, 75-85, 125-135, 165-185, 225-245. Soil solutions were extracted, in which the chemical speciation of Ca, Mg, K and sulfate was evaluated. In the columns, the EC decreased with the increase of applied accumulated water and the pH values were not influenced. The Ca and S contents increased along the entire length of the column, as the gypsum doses were increased, until close to 60 cm. Mg was the most leached cation with increasing gypsum doses. K was leached up to 100 cm. The available levels of Ca, Mg, K and SO₄²⁻ increased in the deeper layers, according to the doses. The Ca and S contents, both in the shoot and in the bean grains, were higher with the increase of the applied dose, while the Mg and K contents decreased. The dry matter production of the bean shoot showed a quadratic behavior, increasing up to the rate of 10.48 t ha⁻¹. The bean yield increased linearly up to the rate of 15 t ha⁻¹. Most of the elements evaluated in the field study are found free in the solution.

Keywords: agricultural gypsum, soil conditioner, leaching, nutrient balance, agronomic efficiency, root growth.

Sumário

	PIMEIRA PARTE	10
1	INTRODUÇÃO GERAL	10
	REFERÊNCIAS	14
	SEGUNDA PARTE (Artigos)	18
	ARTIGO 1 - Efeito de doses de gesso na distribuição de íons em perfil de Latossolo: Estudos em coluna de lixiviação	19
	RESUMO	20
	ABSTRACT	21
	RESUMO	21
1	INTRODUÇÃO	22
2	MATERIAL E MÉTODOS	24
2.1	Coleta e caracterização do solo	24
2.2	Aplicação dos tratamentos nas colunas e condução do experimento	25
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS	52
	ARTIGO 2- Influência da aplicação de gesso no perfil de um Latossolo argiloso: Disponibilidade de nutrientes e desenvolvimento do feijoeiro (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	56
	RESUMO	57
	ABSTRACT	58
1	INTRODUÇÃO	59
2	MATERIAL E MÉTODOS	60
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
3.1	pH e teores de íons disponíveis	64
3.2	Produção de matéria seca da parte aérea e grãos	70
3.3	Análise nutricional da parte aérea do feijoeiro	73
3.4	Análise nutricional dos grãos do feijoeiro	76
3.5	Distribuição do sistema radicular do feijoeiro nas colunas de solo	78
4	CONCLUSÃO	81
	REFERÊNCIAS	82
	ARTIGO 3- Especiação iônica da solução de Latossolo após 76 meses da aplicação de altas doses de gesso em lavoura cafeeira	86
	RESUMO	87
	ABSTRACT	88
1	INTRODUÇÃO	89
2	MATERIAL E MÉTODOS	90

3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	93
4	CONCLUSÃO	106
	REFERÊNCIAS	107

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO GERAL

A agricultura brasileira se expandiu nas últimas décadas para as áreas de cerrado, por serem áreas que apresentam topografia adequada para a mecanização. Essa expansão ocorreu, predominantemente, para a classe dos Latossolos (LOPES; GUILHERME, 2016), que ocupa cerca de 50% da área de cerrado do Brasil. Os Latossolos são solos caracterizados pelo elevado grau de intemperismo, baixa fertilidade natural, elevada estabilidade dos agregados, baixa densidade do solo, porosos e friáveis, características físicas que favorecem a mecanização (DONAGEMMA, et al. 2016). Contudo, os Latossolos apresentam sérias limitações de ordem química, limitantes ao desenvolvimento normal das raízes (DONAGEMMA, et al. 2016; GUIMARÃES, 1992), notavelmente nas camadas subsuperficiais (RAIJ, 1988). Com a expansão da agricultura para a região do cerrado, iniciada na década de 70 e com um salto significativo na década de 90, essas limitações tornam as lavouras mais sensíveis ao déficit hídrico, devido ao menor desenvolvimento das raízes (CARDUCCI, et al. 2014; DINIZ, 2006; SILVA, 1998).

As condições físico-hídricas do solo são de extrema importância para as lavouras, considerando que as plantas necessitam retirar do solo uma grande quantidade de água para suportar a produção de frutos (COGO, et al. 2020). Assim, garantir o bom desenvolvimento das raízes e, conseqüentemente, aumentar a profundidade de exploração do solo é importante, tendo em vista que a baixa capacidade de retenção de água dos solos pode ser compensada com o maior volume de solo explorado pelo sistema radicular (CARDUCCI et al. 2014; SILVA et al. 2017).

O solo pode ser naturalmente ácido em razão da pobreza do material de origem em bases como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ . Além disso, a remoção de bases e sílica é um dos principais processos de formação que levam à perda dessas bases para camadas mais profundas do solo, fora do alcance das raízes e, portanto, contribuem para a acidificação do solo (ALMEIDA, et al., 2021, ALMEIDA, et al. 2021; QUAGGIO, 2000).

A principal limitação para a agricultura na região dos cerrados é a baixa fertilidade natural, com baixos teores de nutrientes, elevada acidez pela falta de bases e presença de alumínio, teores médios de matéria orgânica, baixa CTC e elevada saturação por alumínio (Al) que limitam o desenvolvimento da maioria das culturas (ALMEIDA, et al. 2021; SOUZA; LOBATO; REIN, 2005).

A deficiência de cálcio (Ca) e a acidez das camadas superficiais do solo podem ser corrigidas com a aplicação de calcário (MARQUES; FAQUIN; GUIMARÃES, 1999). No entanto, a calagem não corrige a acidez e a deficiência de Ca no subsolo, podendo, essa acidez, comprometer a produtividade das culturas (PARECIDO, et al. 2021; SOUZA; LOBATO; REIN, 2005). Elevados teores de Al tóxico e/ou quantidades inadequadas de Ca no subsolo restringem o alongamento das raízes das plantas e diminuem a capacidade da cultura de explorar as reservas de água e nutrientes, resultando em perdas de rendimento (SHAMSUDDIN; FAUZIAH, 2010; CARVALHO; RAIJ, 1997).

A aplicação de gesso agrícola é uma alternativa para reduzir os teores de Al tóxico e fornecer Ca^{2+} e SO_4^{2-} em profundidade (TIECHER et al. 2018). Com essas alterações, o gesso propicia o crescimento radicular no subsolo, aumentando o aproveitamento de água e nutrientes pelas raízes das plantas (PARECIDO et al. 2021; CARDUCCI et al. 2014, RAMOS et al. 2019; GUIMARÃES, 1992). O gesso agrícola é um subproduto da indústria de ácido fosfórico e contém principalmente SO_4 e Ca, além de pequenas quantidades de fósforo e flúor (ZOCA; PENN, et al. 2017). Em razão da expressiva área de solos ácidos e profundos na região do cerrado brasileiro, que também é sujeita a períodos de seca consideráveis, este subproduto é considerado como atenuante dos efeitos da escassez de água para as plantas (SILVA, et al. 2014; SERAFIM et al., 2011), notadamente onde a incidência de veranicos e o déficit hídrico são maiores.

O gesso não corrige diretamente o pH do solo. Por ser mais solúvel, comparativamente ao calcário, quando aplicado em superfície no solo, o gesso é dissociado, liberando o ânion sulfato (SO_4^{2-}) que associado a um cátion (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+), forma pares iônicos neutros (CaSO_4^0 , MgSO_4^0 , K_2SO_4^0), dando a capacidade de movimentar-se ao longo do perfil do solo pela percolação da água, diminuindo a atividade do Al^{3+} (PAVAN, et al 1984; SUMNER, 1995). Como resultado, há maior crescimento da raiz em profundidade, resultando em maior absorção de água e de nutrientes pelas plantas (SUMNER et al. 1995; CARVALHO; VAN RAIJ, 1997). Entretanto, as aplicações de gesso em excesso podem promover o deslocamento de outros cátions no complexo de troca. Nesse contexto, a lixiviação de Mg tem sido muitas vezes observada nos estudos com aplicação de gesso (OLIVEIRA; PAVAN, 1996; CAIRES et al. 1999; TOMA et al. 1999; FARINA et al. 2000).

Caires et al, (2011), estudando a aplicação de gesso em um Latossolo vermelho, concluem que a aplicação do gesso em um solo já corrigido, onde foi implantado o sistema de plantio direto, melhorou os níveis de Ca^{2+} nas camadas superficiais e subsuperficiais, apresentando maiores teores do cátion até a profundidade de 60 cm, com a aplicação de 9 t ha⁻¹

¹ de gesso. Os níveis de Mg^{2+} se mantiveram suficientes para o crescimento das plantas, apresentando uma concentração menor na camada de 0-5 cm e um pequeno aumento na camada de 5-10 cm. A aplicação do gesso teve um efeito residual nos teores de sulfato no solo, em longo prazo.

Outro estudo realizado por Michalovicz et al, (2018), envolvendo doses crescentes de gesso (0, 1,5, 3,0, 4,5 e 6,0 t ha⁻¹ de gesso), mostrou um aumento linear nos teores de Ca^{2+} , até a camada de 60 cm, uma diminuição no teor de Mg^{2+} , na camada até 10 cm, com aumento linear nas camadas até 40cm de profundidade, não havendo diferenças nos teores de K em função das doses e profundidades. Neste estudo, os autores avaliaram, 6 meses após a aplicação das doses de gesso, o perfil do solo até 80 cm de profundidade.

A aplicação de gesso (0, 7 e 56 t ha⁻¹) em Latossolo cultivado com cafeeiro, avaliando-se amostras de solos coletadas 16 meses após aplicação das doses de gesso, constataram que houve redução no pH da solução do solo em todas as doses até a profundidade de 85 cm, aumento no teor de Ca^{2+} , aumento no teor de Mg^{2+} nas camadas abaixo de 20 cm até 40 cm e redução no teor de K^+ ao longo do perfil, independentemente das doses de gesso aplicadas (RAMOS et al., 2013)

O uso de doses inadequadas de gesso pode provocar desbalanços entre as bases do solo, elevando muito os teores de Ca em relação aos de Mg e K; esse desequilíbrio nutricional reflete na produtividade das culturas (PARECIDO et al. 2021; MARQUES; FAQUIN; GUIMARÃES, 1999; TOMAZ et al., 2003). Além disso, o sulfato, proveniente do gesso, geralmente não é retido na camada superficial do solo e, sendo lixiviado, carrega perfil abaixo quantidades equivalentes de cátions, em função da formação de pares iônicos neutros, os quais tendem a apresentar significativa mobilidade. Isso ocasiona deslocamento/mobilização vertical de cátions para as camadas mais profundas, podendo alguns cátions serem carregados para camadas não exploradas pelas raízes das plantas (CREMON et al., 2009; NEIS et al., 2010). Dessa forma, o acompanhamento dos teores de nutrientes em diferentes profundidades do solo torna-se imprescindível para o alcance de maiores produtividades (PARECIDO et al. 2021; RAMOS et al. 2019; RAMOS et al. 2013).

Uma forma de se acompanhar o movimento desses íons no perfil do solo é através de análises na solução do solo em diferentes profundidades e tempos, a partir da aplicação (RAMOS et al. 2019; RAMOS et al. 2013). A especiação da solução do solo visa determinar a concentração e a distribuição dos elementos químicos em suas várias espécies e os seus possíveis estados de oxidação. Essa distribuição inclui íons livres, complexos, pares iônicos e

quelatos em solução e influencia a reatividade, a mobilidade e a disponibilidade dos elementos para as plantas (PEREIRA, 2005).

A especiação aplicada a solos envolve a fase líquida e a fase sólida, destacando ainda mais as limitações apenas da fase sólida (PÉREZ, 2003). Os parâmetros de uma solução determinam quais as espécies irão predominar e se a hidrólise, precipitação, complexão ou reação de sorção ocorrerá (SPOSITO, 1989). A estimativa da atividade e da especiação química dos íons em solução geralmente é efetuada por meio de programas computacionais, como o Visual Minteq (GUSTAFFSON, 2012).

Chaves et al. (1991) avaliaram a disponibilidade e absorção de Ca e Al por plantas de café adubadas com diferentes fontes de cálcio. Nesse estudo, os autores concluíram que absorção de Ca pelas raízes das plantas diminuiu com a redução da valência do par formado em solução, com nitrato (CaNO_3^+), cloreto (CaCl^+) ou sulfato (CaSO_4^0).

Diante da realidade da escassez de água no planeta, a possibilidade de uso de técnicas inovadoras que possibilitem o uso eficiente da água armazenada no subsolo tem merecido a atenção de pesquisadores (FAGGION; OLIVEIRA; CHRISTOFIDIS, 2009). Soma-se a isto a demanda de bases científicas para validar e, ou ajustar recomendações sobre a aplicação do gesso agrícola, de modo que sua difusão aconteça de forma ordenada e mais correta possível.

Desse modo, estudos que identificam e quantificam os efeitos causados em médio-longo prazo pela excessiva adição de gesso e, em particular estudos da lixiviação dos pares iônicos em subsuperfície, são imprescindíveis, principalmente do ponto de vista nutricional das plantas.

Diante do exposto, o presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de: i) avaliar a mobilidade e o efeito de doses crescentes de gesso agrícola no pH, na condutividade elétrica e nos teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e enxofre (S), determinados no efluente coletado em colunas de lixiviação com diferentes profundidades; ii) avaliar a disponibilidade de Ca, Mg, K e S em amostras de solos coletadas em diferentes profundidades, até 100 cm, em colunas ao final das lixiviações (após 510 dias de incubação com doses de gesso e após uma quantidade acumulada de água de 1568,40 mm); iii) avaliar o efeito das doses de gesso no cultivo de feijoeiro (produção de massa seca, grãos, teores nutricionais e distribuição do sistema radicular em profundidade); e iv) avaliar a especiação iônica da solução do solo em perfil do solo (até 245 cm) após 76 meses da aplicação de altas doses de gesso agrícola em uma lavoura de café implantada em Latossolo Vermelho distrófico.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, C.C.; FONTES, M.P.F.; DIAS, A.C.; PEREIRA, T.C.T.; KER, J. C. Adsorption and desorption of arsenic and its immobilization in soils. **Scientia Agricola**. 2021.

CAIRES, E.F.; FONSECA, A.F.; MENDES, J.; CHUEIRI, W.A. & MADRUGA, E.F. Produção de milho, trigo e soja em função das alterações das características químicas do solo pela aplicação de calcário e gesso na superfície, em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 23:315-327, 1999.

CAIRES, E.F.; MASCHIETTO, E.H.G.; GARBUIO, F.J.; CHURKA, S. & JORIS, H.A.W. Surface application of gypsum in low acidic Oxisol under no-till cropping system. **Scientia Agrícola**. 68:45-53, 2011.

CARDUCCI et al., Distribuição espacial das raízes de cafeeiro e dos poros de dois Latossolos sob manejo conservacionista. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. 2014.

CARVALHO, M. C. S.; VAN RAIJ, B. Calcium sulphate, phosphogypsum and calcium carbonate in the amelioration of acid subsoils for root growth. **Plant and Soil**, v. 192, n. 1, p. 37-48, 1997.

CHAVES, J. C.D; PAVAN, M. A.; MIYAZAWA, M. Especificação Química da Solução do Solo para Interpretação da Absorção de Calcio e Alumínio por Raízes de Cafeeiro. **Área de Informação da Sede-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 1991.

COGO, F. D. et al. High rates of agricultural gypsum affect the arbuscular mycorrhiza fungal community and coffee yield. **Bragantia**, v. 79, p. 612-622, 2020.

CREMON, C. et al. Análise micromorfológica de agregados de um Latossolo Vermelho Distroférico em diferentes sistemas de manejo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.31, n.1, p.139-146, mar.2009.

DINIZ, B. P. C. **O Grande Cerrado do Brasil Central: geopolítica e economia**. 231 p. Tese (Doutorado em geografia) - Universidade de São Paulo- SP. 2006.

DONAGEMMA, G. K.et al. Characterization, agricultural potential, and perspectives for the management of light soils in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1003-1020, 2016.

FAGGION, F.; OLIVEIRA, C. A. S.; CHRISTOFIDIS, D. Uso eficiente da água: uma contribuição para o desenvolvimento sustentável da agropecuária. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava, v. 2, n. 1, p. 187-190, jan./abr. 2009.

FARINA, Martin Patrick Warner; CHANNON, P.; THIBAUD, Guy Richard. A Comparison of Strategies for Ameliorating Subsoil Acidity I. Long-Term Growth Effects. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 2, p. 646-651, 2000.

GUSTAFSSON, J. P. Visual MINTEQ ver. 3.1. Department of Land and Water Resources Engineering, KTH. **Royal Institute of Technology**, SE-100 44, Stockholm, Sweden. 2012.

GUIMARÃES, P. T. G. **O uso do gesso agrícola na cultura do cafeeiro. In: Seminário sobre o uso do gesso na agricultura**, 1992.

LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G. Fertilidade do solo e produtividade agrícola. In: Novais et al. (Eds). Fertilidade do solo. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa-MG, p. 1-64, 2007.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. S. G. A career perspective on soil management in the cerrado region of Brazil. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 137, p. 1-72, 2016.

MARQUES, E.S.; FAQUIN, V.; GUIMARÃES, P.T.G. Teores foliares de nutrientes no cafeeiro (*Coffea arabica* L.) em resposta a calcário e gesso. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.23, n.1, p.140-151, jan./mar. 1999.

MICHALOVICZ, L, M. M. LOPES; TORMENA, CASSIO ANTONIO; DICK, WARREN A. ; VICENSI, MARCELO ; MEERT, LEANDRO . Soil chemical attributes, nutrient uptake and yield of no-till crops as affected by phosphogypsum doses and parceling in southern Brazil. **Archives of Agronomy and Soil Science** v. 65, p. 1-15, 2018.

NEIS, L. et al. Gesso agrícola e rendimento de grãos de soja na região do sudoeste de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 2, p. 409-416, fev. 2010.

OLIVEIRA, E. L.; PAVAN, M. A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.38, n. 1, p. 47-57, 1996.

PARECIDO, R. J. et al. Limestone increased coffee yield and profitability more than phosphogypsum or their combination. **Agronomy Journal**, v. 113, n. 4, p. 3586-3599, 2021.

PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T. & PRATT, P.F. Redistribution of exchangeable calcium, magnesium and aluminum following lime and gypsum applications to a Brazilian Oxisol. **Soil Society of America Journal**., 48:33-38, 1984.

PEREIRA, B. F. F. **Potencial fitorremediador das culturas de feijão-de-porco, girassol e milho cultivadas em Latossolo Vermelho contaminado com chumbo**. 2005. 68 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical/Gestão de Recursos Agroambientais) - Instituto Agrônomo, Campinas, 2005.

PÉREZ, D.V.; CAMPOS, R.C. Especiação em solos - aspectos gerais. **Documentos. Embrapa**. Rio de Janeiro. v.47. p.07-33. 2003.

QUAGGIO, J.A. Acidez e calagem em solos tropicais. **Campinas: Instituto Agrônomo**, 2000.

RAIJ, B. van. Gesso agrícola na melhoria do ambiente radicular no subsolo. São Paulo, **ANDA**, 1988.

RAMOS, B.Z. et al. Ionic speciation in a dystrophic red latosol under coffee crop and high doses of gypsum. **Coffee Science**, 14(3): 281-290, 2019.

RAMOS, B. Z.; TOLEDO, J. P. V. F.; LIMA, J. M.; SERAFIM, M. E.; BASTOS, A. R. R.; GUIMARÃES, P. T. G.; COSCIONE, A. R. Doses de gesso em cafeeiro: influência nos teores de cálcio, magnésio, potássio e pH na solução de um Latossolo Vermelho Distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.1018-1026, 2013.

SERAFIM, M.E.; OLIVEIRA, G. C.; OLIVEIRA, A. S.; LIMA, J. M.; GUIMARÃES, P. T.G.; COSTA, J. C. Sistema conservacionista e de manejo intensivo do solo no cultivo de cafeeiros na região do alto São Francisco, MG: Um estudo de caso. **Bioscience Journal. Uberlândia**, v. 27, n. 6, p. 964-977, 2011.

SHAMSHUDDIN, J.; FAUZIAH, I. C. Alleviating acid soil infertility constraints using basalt, ground magnesium limestone and gypsum in a tropical environment. **Malaysian Journal of Soil Science, Selangor Darul Ehsan**, v. 14, n. 2, p. 1-13, 2010.

SILVA, A. A. et al. Efeitos de relações $CASO_4/CACO_3$ na mobilidade de nutrientes no solo e no crescimento do algodoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 1, p. 451-457, jan./jun. 1998.

SILVA, E. A.; OLIVEIRA, G. C.; SILVA, B. M.; CARDUCCI, C. E.; AVANCI, J. C.; SERAFIM, M. E. Aggregate stability by the 'high energy moisture characteristic' method in an oxisol under differentiated management. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1633-1642, 2014.

SILVA, É.A.; CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; SILVA, B. M.; SERAFIM, M. E. Estrutura de solos em manejo conservacionista: diagnóstico visual, laboratorial, caracterização e inter-relações. **Scientia Agraria**, v. 18, p. 61-73, 2017.

SOUZA, D. M. G.; LOBATO, S.; REIN, T. A. Uso de gesso agrícola nos solos do Cerrado. **Documentos / Embrapa Cerrados, Circular Técnica n. 32**, Planaltina, DF, 19 p, 2005.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York: **Oxford University Press**, 1989.

SUMNER, M. E. Amelioration of subsoil acidity with minimum disturbance. In: JAYAWARDANE, N.S. & STEWART, B.A., eds. Subsoil management techniques. **Athens, Lewis Publishers**, p.147-185, 1995.

TIECHER T, PIAS OHC, BAYER C, MARTINS AP, DENARDIN LGO, ANGHINONI I. Crop response to gypsum application to subtropical soils under no-till in Brazil: a systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2018.

TOMA, M. et al. Long-term effects of gypsum on crop yield and subsoil chemical properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, n. 4, p. 891-895, 1999.

TOMAZ, M. A. et al. Eficiência de absorção, translocação e uso de cálcio, magnésio e enxofre por mudas enxertadas de Coffea arábica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.27, n.5, p.885-892, jun./jul.2003.

ZOCA, S. M.; PENN, C. An important tool with no instruction manual: a review of gypsum use in agriculture. **Advances in Agronomy**, v. 144, p. 1-44, 2017.

SEGUNDA PARTE

Artigos

ARTIGO 1 - Efeito de doses de gesso na distribuição de íons em perfil de Latossolo:
Estudos em coluna de lixiviação

Norma NBR 6022 (ABNT 2003) (Versão preliminar)

Raul Magalhães Ferraz¹, Guilherme Lopes¹

¹ Departamento de Ciências dos Solos, Universidade Federal de Lavras (UFLA), MG, Brasil.

RESUMO

A agricultura brasileira vem se expandindo, desde a década de 1970, em áreas de cerrado, onde predominam os Latossolos, propícios para a mecanização, porém, com limitações químicas ao longo do perfil, tais como baixa capacidade de troca de cátions e teores de alumínio relativamente mais elevados. Assim, técnicas e/ou práticas de manejo que visam superar essas limitações são necessárias. Como são solos com baixa fertilidade natural e alta acidez, o uso de corretivos e fertilizantes se torna indispensável. Em geral, o calcário é o corretivo mais empregado, mas tem sua atuação praticamente restrita à camada superficial do solo. Nesse contexto, com o intuito de condicionar melhor as camadas mais profundas do solo, o gesso agrícola tem sido utilizado. Além de reduzir a toxidez do Al, o gesso é fonte de cálcio e enxofre, o que contribui para o aprofundamento do sistema radicular das plantas. Entretanto, pouco se sabe sobre a velocidade de movimentação de cálcio, enxofre e outros pares iônicos com o sulfato no perfil do solo. Diante disso, o presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a mobilidade e o efeito de doses crescentes de gesso agrícola no pH, na condutividade elétrica e nos teores de cálcio, magnésio, potássio e enxofre, determinados no efluente coletado em colunas de lixiviação com diferentes profundidades de colunas de solo. O trabalho foi realizado em casa de vegetação, onde colunas foram montadas com tubos de PVC, com amostras de um Latossolo Vermelho distrófico coletado em área de vegetação nativa, respeitando as profundidades de campo de 10, 20, 40, 60 e 100 cm. As doses de gesso, equivalentes a 0, 1,5, 3, 7, 11 e 15 t ha⁻¹, foram aplicadas na superfície das colunas. Ao longo de 510 dias, foram adicionadas quantidades conhecidas de água deionizada em cada coluna e foram realizadas 15 coletas de lixiviados no decorrer desse tempo, tendo sido adicionado ao todo 1568,40 mm de água. Em todas as amostras de efluentes coletadas, foram determinados a condutividade elétrica, o pH e os teores dos elementos Ca, Mg, K e S. A maior influência das diferentes doses de gesso ocorreu nas colunas com 10 e 20 cm de profundidade para todos os elementos. Ca, Mg e K foram encontrados nos efluentes das colunas de 100 cm de profundidade, independentemente da dose de gesso aplicada. Já o S foi encontrado somente no tratamento G15, após o acúmulo de 1200 mm de água, tendo seu teor mais elevado, em relação aos demais, na coluna de 40 cm. A condutividade elétrica diminuiu com o aumento de água acumulada aplicada e os valores de pH não foram influenciados pelas doses de gesso agrícola. Ca, Mg e K, se moveram no perfil do solo a uma velocidade de 0,40, 0,85 e 0,85 cm dia⁻¹, respectivamente. As quantidades dos elementos que se movimentaram (em $\mu\text{mol}_c \text{ dia}^{-1}$) seguiram a ordem crescente: S<K~Mg<Ca.

Palavras-chave: gesso agrícola, condicionador de solo, lixiviação, balanço de nutrientes, mobilização de íons, perfil de solo.

ABSTRACT

Brazilian agriculture has been expanding since 1970s in cerrado areas, where Latosols predominate. These soils are suitable for mechanization, but present chemical limitations along the soil profile, such as low cation exchange capacity and high aluminum contents. Thus, techniques and/or management practices to overcome these limitations are necessary. As they are soils with low natural fertility and high acidity, the use of amendments and fertilizers becomes crucial. In general, limestone is the most used amendment to correct soil acidity, but its action is practically restricted to the superficial soil layer. In this context, to amending and improving soil condition in deeper soil layers, agricultural gypsum has been used. Besides reducing Al toxicity, gypsum is a source of calcium and sulfur, which contributes to the plant root growth throughout the soil profile. However, little is known about how calcium, sulfur and other ionic pairs with sulfate move down to the soil profile. Therefore, the present work was carried out aiming to evaluate the mobility and the effect of increasing doses of agricultural gypsum on pH, electrical conductivity and calcium, magnesium, potassium and sulfur contents, determined in the effluent collected from leaching columns. The work was carried out in a greenhouse, where columns were assembled with PVC tubes, with samples of a dystrophic Red Latosol collected in an area of native vegetation, respecting field depths of 10, 20, 40, 60 and 100 cm. Gypsum doses, equivalent to 0, 1.5, 3, 7, 11 and 15 t ha⁻¹, were applied to the surface of the columns. During 510 days, known volumes of deionized water were added to each column and 15 leachate collections were performed, with a total of 1568.40 mm of water being added. In all effluent samples collected, the electrical conductivity, pH and contents of the elements Ca, Mg, K and S were determined. The greatest influence of different gypsum doses occurred in columns with 10 and 20 cm depth for all elements. Calcium, Mg and K were found in the effluents of the column with 100 cm depth, irrespectively of the applied gypsum dose. On the other hand, S was found only in the G15 treatment, after the accumulation of 1200 mm of water, with its highest content, in relation to the others, being found in the column of 40 cm depth. Electrical conductivity decreased upon increasing the applied accumulated water and the pH values were not influenced by the doses of agricultural gypsum. Calcium, Mg and K moved down to soil profile at a estimate speed of 0.40, 0.85, and 0.85 cm day⁻¹, respectively. The movement of the assessed elements followed the ascending order: S<K~Mg<Ca.

Keywords: agricultural gypsum, soil conditioner, leaching, nutrient balance, ion mobilization, soil profile.

1 INTRODUÇÃO

A agricultura brasileira se expandiu nas últimas décadas para a região dos cerrados, principalmente em razão da topografia mais adequada à mecanização. Essa expansão se deu predominantemente sobre a classe dos Latossolos (LOPES; GUILHERME; RAMOS, 2012), que ocupa cerca de 46% da área de cerrado do Brasil. Os Latossolos são caracterizados pelo elevado grau de intemperismo, baixa fertilidade natural, contrastando com a elevada estabilidade dos agregados, baixa densidade do solo, elevada porosidade total e alta friabilidade, características que favorecem o seu manejo (LOPES; GUILHERME, 2016). Contudo, esses solos apresentam, no geral, baixa capacidade em reter água e sérias limitações de ordem química, que dificulta o desenvolvimento normal das raízes, tanto na camada superficial, quanto em profundidade (GOMES, et al. 2019).

Boas condições físico-hídricas do solo são de extrema importância para o cultivo de lavouras produtivas, considerando que a planta necessita retirar do solo uma grande quantidade de água para suportar a produção de frutos. Assim, garantir o bom desenvolvimento das raízes e, conseqüentemente, aumentar a profundidade de exploração do solo é importante, tendo em vista que a baixa capacidade de retenção de água, notadamente nesses solos, pode ser compensada com o maior volume de solo explorado pelo sistema radicular (SOUZA; RITCHEY, 1986).

Solos podem ser naturalmente ácidos, em razão dos processos de formação ou de manejo que levam à perda dessas bases para camadas mais profundas, fora do alcance das raízes (QUAGGIO, 2000). Algumas causas importantes de acidificação do solo, que são relacionadas ao seu manejo, são a aplicação de fertilizantes, principalmente os nitrogenados amoniacais, a decomposição da matéria orgânica e a nitrificação (conversão de amônio a nitrato) (GOULDING, 2016).

A elevada acidez dos solos limita o desenvolvimento e à produção da maioria das plantas cultivadas em várias partes do mundo (SHETTY; PRAKASH, 2020). Nesse sentido, a correção da acidez é indispensável para aumentar a disponibilidade de nutrientes e, portanto, propiciar um melhor crescimento e desenvolvimento das plantas. Além disso, práticas de adubação, bem como práticas visando manter a matéria orgânica, a atividade biológica e as propriedades físicas do solo, também são importantes (GUIMARAES, 1992).

A deficiência de cálcio (Ca) e a acidez nas camadas superficiais do solo podem ser corrigidas com a aplicação de calcário (MARQUES; FAQUIN; GUIMARÃES, 1999). No entanto, a calagem não corrige a acidez, o alumínio e a deficiência de cálcio em subsuperfície,

o que ainda compromete a produtividade das culturas (SOUZA; LOBATO; REIN, 2005). Elevados teores de Al tóxico e/ou quantidades inadequadas de Ca no subsolo restringem o alongamento das raízes das plantas e diminuem a capacidade da cultura de explorar as reservas de água e nutrientes, resultando em perdas de rendimento (CARVALHO; RAIJ, 1997; SHAMSUDDIN; FAUZIAH, 2010;).

Em casos assim, a aplicação de gesso agrícola é uma alternativa para reduzir os teores de Al tóxico e fornecer Ca^{2+} e SO_4^{-2} em profundidade (PAULETTI et al. 2014), propiciando melhorias do ambiente radicular em profundidade e aumentando o aproveitamento de água pelas raízes das plantas (GUIMARÃES, 1992). O gesso agrícola, um subproduto da indústria de ácido fosfórico, contém principalmente sulfato de Ca, com pequenas quantidades de fósforo (P) e flúor (F) (CAIRES et al., 2003). Considerando o elevado percentual de solos ácidos e profundos na região do cerrado brasileiro, este subproduto (gesso agrícola) tem sido considerado como atenuante das limitações químicas e, em razão de proporcionar o aprofundamento do sistema radicular, permite mitigar períodos de escassez de água para as plantas (SERAFIM et al., 2011), onde a incidência de veranicos e o déficit hídrico são maiores.

O gesso é um sal relativamente solúvel; dissolve com a água de chuva e é levado com relativa facilidade para o subsolo. Sendo assim, o gesso é, portanto, um insumo importante no manejo da fertilidade do subsolo na agricultura em solos mais intemperados (VAN RAIJ, 2008).

Apesar de ser de extrema relevância para a correção das camadas subsuperficiais do solo, a aplicação de doses elevadas de gesso pode provocar desbalanço entre as bases do solo, elevando os teores de Ca em relação aos de Mg e K e induzindo a um desequilíbrio nutricional, com reflexos na produtividade das culturas (MARQUES; FAQUIN; GUIMARÃES, 1999). Além disso, o sulfato, proveniente do gesso, geralmente não é retido na camada superficial do solo; sendo lixiviado, o sulfato carrega no perfil do solo quantidades expressivas de cátions (e.g. Mg e K), em função da formação de pares iônicos neutros que apresentam grande mobilidade. Isso ocasiona deslocamento vertical de cátions para as camadas mais profundas, podendo ultrapassar as camadas exploradas pelas raízes (CREMON et al., 2009; NEIS et al., 2010). A quantidade de íons que podem ser movimentados para camadas inferiores ao longo do perfil do solo depende da dose de gesso aplicada e da quantidade de água infiltrada no solo, bem como das características físico-químicas dos solos. Nesse sentido, estudos em médio-longo prazo visando avaliar a movimentação de íons em

colunas solo, tratado com diferentes doses de gesso, são de suma relevância e necessários para se conhecer o efeito do gesso ao longo do perfil do solo.

Nesse contexto, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar e entender melhor a dinâmica e o efeito de crescentes doses de gesso agrícola nos teores de cálcio, magnésio, potássio, enxofre, pH e condutividade elétrica do efluente coletado a partir de colunas de lixiviação de diferentes profundidades.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Coleta e caracterização do solo

Para a montagem do experimento, foram utilizadas amostras de um Latossolo Vermelho distrófico, coletado em um local de mata nativa no campus da UFLA, nas coordenadas geográficas 21° 13' S, 44° 57' O, em janeiro de 2017. A descrição mineralógica do solo, realizada por Silva et al (2022), indica o predomínio de óxidos de ferro (Hematita, Goethita) na fração argila deste solo. Foram amostradas as profundidades de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40, 40 a 60 e 60 a 100 cm e colocadas, separadamente, em sacos plásticos devidamente identificados. Essas amostras foram secas ao ar e peneiradas em malha de 4 mm antes de serem colocadas nas colunas, mantendo a mesma sequência profundidade de amostragem. Subamostras de cada profundidade foram retiradas, peneiradas em peneira de 2 mm para a caracterização química física do solo (TEIXIERA et al., 2017) (Tabela 1).

Tabela 1 – Caracterização inicial do solo nas diferentes profundidades.

Atributos de fertilidade	Profundidade (cm)				
	0-10	10-20	20-40	40-60	60-100
pH	5,00 – (5,00) *	4,9 – (5,4)	5,00	5,00	5,20
K (mgdm ⁻³)	62,63 – (172,2) *	36,5 – (165,96)	19,10	8,22	3,86
P (mgdm ⁻³)	1,27 – (13,26) *	0,70 – (15,7)	0,56	0,42	0,39
S (mgdm ⁻³)	15,10	7,40	3,54	4,52	5,56
Ca (cmol _c dm ⁻³)	0,5 – (4,32) *	0,20 – (3,44)	0,15	0,13	0,10
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,27 – (1,62) *	0,16 – (1,31)	0,10	0,10	0,10
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,7 – (0,26) *	0,6 – (0,24)	0,5	0,3	0
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	8,42 – (3,26) *	8,42 – (4,44)	6,74	5,83	4,27
SB (cmol _c dm ⁻³)	0,90 – (6,38) *	0,40 – (5,17)	0,30	0,25	0,21
t (cmol _c dm ⁻³)	1,57 – (6,64) *	1,09 – (5,41)	0,79	0,52	0,19
T (cmol _c dm ⁻³)	9,40 – (9,64) *	8,87 – (9,61)	7,04	6,08	4,48
V (%)	10,4 – (66,18) *	5,11 – (53,79)	4,25	4,13	4,69
m (%)	44,5 – (3,91) *	55,0 – (4,43)	63,3	57,7	0,00
M.O (dagkg ⁻¹)	3,9	2,70	3,28	2,01	1,38

P-rem (mgL ⁻¹)	10,21	8,79	6,90	7,47	6,20
Argila (dagkg ⁻¹)	65,00	67,00	65,00	70,00	67,00
Silte (dagkg ⁻¹)	13,00	13,00	14,00	12,00	14,00
Areia (dagkg ⁻¹)	22,00	20,00	21,00	18,00	19,00

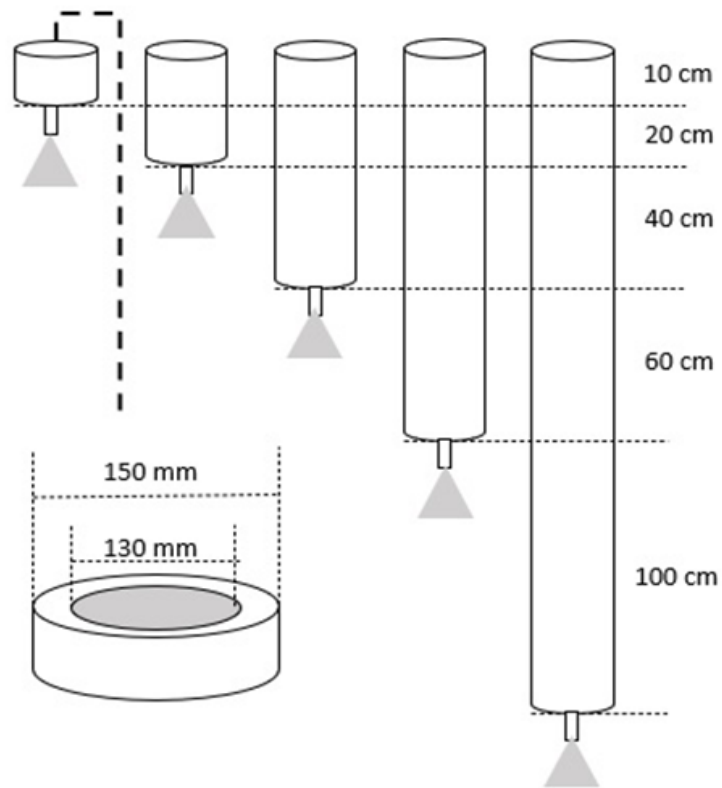
* Valores entre parênteses referem-se às análises realizadas após a correção das camadas iniciais com óxidos de Ca e Mg. pH em água - Relação 1:2,5. Ca - Mg- Al- Extrator: KCl - 1 mol/L. P- K- Extrator Mehlich 1. H + Al - Extrator: SMP. S - Extrator - Fosfato monocálcio em ácido acético. Mat. Org. (MO) - Oxidação: Na₂Cr₂O₇ 4N+ H₂SO₄ 10N. SB: Soma de Bases Trocáveis. CTC (t): Capacidade de Troca Catiônica Efetiva. CTC (T): Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0. V: Índice de Saturação de Bases. m: Índice de Saturação de Alumínio. Textura: Muito Argilosa. Valores entre parênteses se referem aos teores após a correção.
Fonte: Do autor (2021)

Foi feita a correção das camadas iniciais do solo (0 a 10 e 10 a 20 cm), com óxidos de cálcio e de magnésio e também uma potassagem corretiva com fosfato de potássio. Essas práticas corretivas visaram elevar teor de Ca²⁺ para 45% da CTC a pH 7 (T), o Mg²⁺ para 15% e o K⁺ a 5 % da CTC, níveis considerados ideais para solos cultivados (SOUZA; LOBATO, 2004). As amostras foram incubadas por aproximadamente 45 dias em sacos plásticos, os quais receberam água deionizada para atingir umidade próxima da capacidade de campo. Além disso, as amostras nos sacos plásticos foram revolvidas frequentemente, a fim de aumentar a velocidade da reação. Após o período de incubação, as amostras foram submetidas às análises químicas (valores entre parênteses na tabela 1).

2.2 Aplicação dos tratamentos nas colunas e condução do experimento

O experimento foi instalado em casa de vegetação, utilizando-se colunas feitas com tubo de PVC de 150 mm de diâmetro (área da superfície de 0,0176 m²), nas profundidades de 10, 20, 40, 60 e 100 cm. Na base de cada coluna, foi adicionada uma saída para escoamento do lixiviado que foi direcionado para um frasco de vidro com capacidade de 1 litro, conforme apresentado de forma esquemática e por fotografia (Figura 1). Após o empacotamento das colunas, foi adicionada água até próximo à capacidade de campo e deixado por aproximadamente 12 meses, com o objetivo de acomodar o solo antes da aplicação das doses e gesso, sendo submetido a uma sequência de molhamento e secagem, para que o solo pudesse assumir a forma o mais próximo possível da realidade em campo.

Figura 1 – Representação esquemática das colunas de lixiviação.



Legenda: Representação esquemática (acima) e fotografia (abaixo) das colunas de lixiviação; em detalhe a área superficial da coluna (150 mm de diâmetro) e a parte central mais escura (130 mm de diâmetro) que foi delimitada com um anel plástico de menor diâmetro onde o gesso foi aplicado, inserido cerca de 2 cm no solo para evitar escoamento nas laterais da coluna, onde foi aplicado o gesso e a água.

Fonte: Do autor (2021).

A aplicação dos tratamentos, doses de gesso, foi realizada em fevereiro de 2018. Foram consideradas 6 doses crescentes de gesso agrícola, equivalentes a 0, 1,5, 3, 7, 11 e 15 t ha⁻¹, (tratamentos: G0, G1,5, G3, G7, G11 e G15), sendo adicionadas, de acordo com a área, 0, 2,64, 5,28, 12,32, 19,36, 26,40 g de gesso por coluna, respectivamente. A dose 0 foi considerada controle. O gesso foi aplicado dentro de anéis plásticos com 130 mm de diâmetro (Figura 1), colocados no centro da área superficial de cada coluna. O experimento foi conduzido como delineamento inteiramente casualizado, com 6 doses de gesso e 5 profundidades, com 3 repetições, totalizando 90 colunas.

Após a aplicação do gesso na superfície de cada coluna, foi adicionada água deionizada dentro do anel (onde se encontrava o gesso agrícola). Cerca de 24 horas após cada aplicação de água, foi coletado o efluente no final da coluna. Foram realizadas 15 coletas de lixiviado durante 15 meses. Os dias após a aplicação das doses de gesso, em que houve coleta de lixiviado, bem como os volumes de água acumulados em cada coleta realizada estão descritos na tabela 2.

Tabela 2 – Volume de água aplicada ao longo do período de coleta, até o final do experimento.

Dias Coleta	Água acumulada (mm)
1	19,30
29	75,20
57	171,25
69	224,65
90	296,81
118	372,38
153	468,71
187	554,20
211	639,43
251	747,38
282	886,59
313	971,81
386	1199,09
416	1335,45
510	1568,40

Fonte: Do autor (2021).

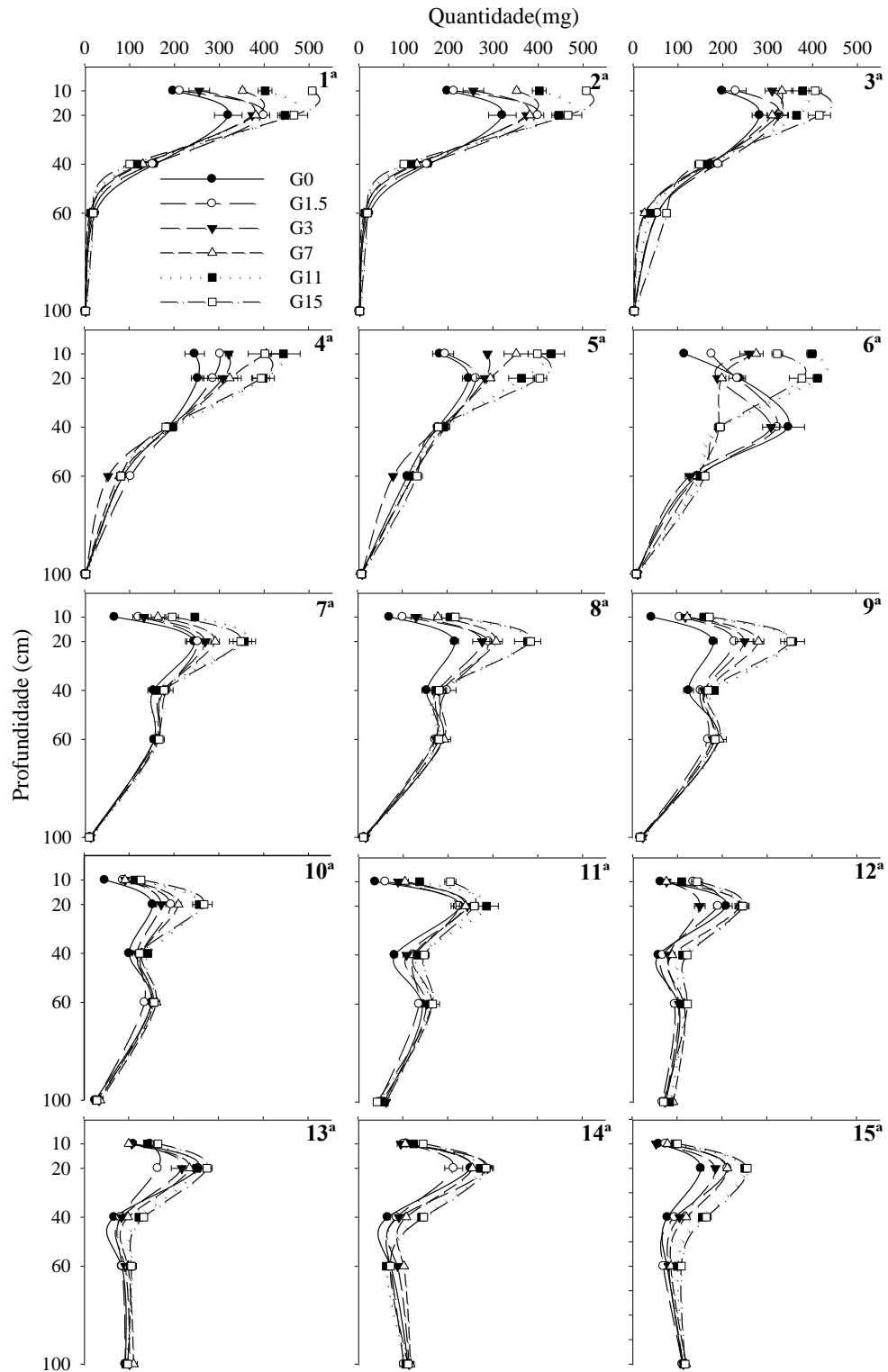
Após cada coleta, o efluente foi filtrado a 0,45 μm e submetido a análises de pH e condutividade elétrica (CE) usando pHmetro e condutivímetro da marca Mettler Toledo. Adicionalmente, as amostras de efluentes foram analisadas por espectrometria de emissão atômica de plasma acoplado individualmente (ICP-OES), visando avaliar a concentração de cálcio, magnésio, potássio e enxofre.

Os dados obtidos foram trabalhados por meio de estatística descritiva. Nesse contexto, para cada atributo (variável resposta) e tratamento, foram calculados a média e o erro padrão da média, os quais foram apresentados nos gráficos, afim de demonstrar a variabilidade dos dados obtidos, o que permite inferir sobre a diferença entre os tratamentos avaliados. As figuras foram geradas a partir do software Sigma Plot®.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados encontrados para os teores do cátion Ca no efluente das 15 coletas realizadas ao longo de aproximadamente 15 meses (Figura 2). Na 1ª coleta na coluna de 10 cm de profundidade o teor de Ca foi maior conforme a dose aplicada, devido ao Ca ser fornecido pelo gesso, que apresenta cerca de 30% de Ca em sua composição (ALCORDO; RECHCIGL, 1993). O mesmo comportamento ocorreu até a 5ª coleta na profundidade de 20 cm, onde com maiores doses de gesso foram encontrados maiores teores no efluente. Resultados semelhantes foram encontrados por Ramos et al. (2013), onde avaliando os teores em um Latossolo muito argiloso cultivado com cafeeiro aos 16 meses após a aplicação de gesso. Os autores relataram maiores teores de Ca nas camadas superficiais, conforme se aumentaram as doses de gesso aplicadas (0, 7, 56 t ha⁻¹).

Figura 2 – Teores de cálcio no efluente (mg L^{-1}) em 15 coletas realizadas.



Legenda: Resultados dos teores de cálcio no efluente (mg L^{-1}) em 15 coletas realizadas.

(*) Barras horizontais referem-se ao erro padrão da média.

Fonte: Do autor (2021).

Ferraz (2017), avaliando o mesmo solo na lavoura cafeeira, aos 76 meses após a aplicação de crescentes doses gesso, também reportou um aumento do teor de Ca na solução do solo, conforme se aumentou a dose de gesso aplicada. Na mesma linha de raciocínio, trabalhos avaliando o uso do gesso em sistemas de plantio direto encontraram esse aumento do Ca na superfície do solo e, com o passar do tempo, inclusive em maiores profundidades (CAIRES et al. 2016; TIECHER et al. 2018).

A partir da 6ª coleta, com 153 dias e 372,38 mm de água após aplicação dos tratamentos (Tabela 2), o maior teor de Ca foi encontrado na profundidade de 20 cm, em razão da maior quantidade de Ca aplicada nestas camadas devido a correção inicial. Nora et al. (2017), em estudo realizado em um Latossolo distrófico, onde avaliações foram realizadas aos 30 e 56 meses após a aplicação de doses crescentes de gesso até a dose de 5 t ha⁻¹, encontraram aumento do teor de Ca no solo até 60 cm de profundidade, com aumento das doses aplicadas. Ramos et al. (2013) encontraram resultados semelhantes em uma avaliação da solução do solo aos 16 meses após a aplicação de gesso em lavoura cafeeira, reportando maiores valores de Ca a 40 cm de profundidade.

Na 13ª, 14ª e 15ª coletas, os teores de Ca no efluente aumentaram na camada de 40 cm, principalmente nos tratamentos G11 e G15, mostrando que com maior acúmulo de água aumenta a descida do cátion ao longo do perfil. O gesso necessita de tempo em contato com água para seu carreamento ao longo do perfil (Nora et al. 2017; Caires et al. 2011). Em todos os tratamentos aplicados, inclusive o controle, a partir da 10ª coleta na profundidade de 100 cm o teor de Ca aumentou em relação as primeiras coletas realizadas indicando que com aplicação de água o Ca se move no perfil do solo à velocidade média aproximada de 0,40 cm dia⁻¹, independente da dose de gesso aplicada. Importante destacar que os Latossolos têm basicamente a totalidade das cargas dependentes de pH (WEBER et al. 2005). Visto que o pH não foi corrigido nas camadas mais profundas, há um predomínio de cargas positivas oriundas de óxidos de Fe e Al, as quais repelem o Ca. Assim, mesmo sendo um solo muito argiloso, o fluxo de água aplicado fez com que parte do Ca fosse lixiviado.

As quantidades acumuladas de cálcio no efluente, levando em consideração a quantidade acumulada de água aplicada em cada coluna (Figura 3). Nas colunas de 10 e 20 cm de profundidade, a quantidade acumulada de cálcio foi crescente de acordo com as doses aplicadas, sendo a maior quantidade para o tratamento G15. Na coluna de 20 cm, as quantidades finais de Ca foram superiores às encontradas na coluna de 10 cm, devido ao início do trabalho onde as duas camadas foram corrigidas separadamente; por isso, a coluna

maior de 20 recebeu no total uma quantidade maior de CaO que na coluna de 0-10 cm. O trabalho de Ramos, et al. (2019), estudando, em condições de campo, Latossolo muito argiloso com as doses 0, 7 e 56 t ha⁻¹, ao avaliar a solução do solo 16 meses após aplicação dos tratamentos, relataram que a quantidade de Ca disponível na solução aumentou de acordo com as doses aplicadas até 25 cm de profundidade.

Figura 3 – Quantidades de Ca acumulada.

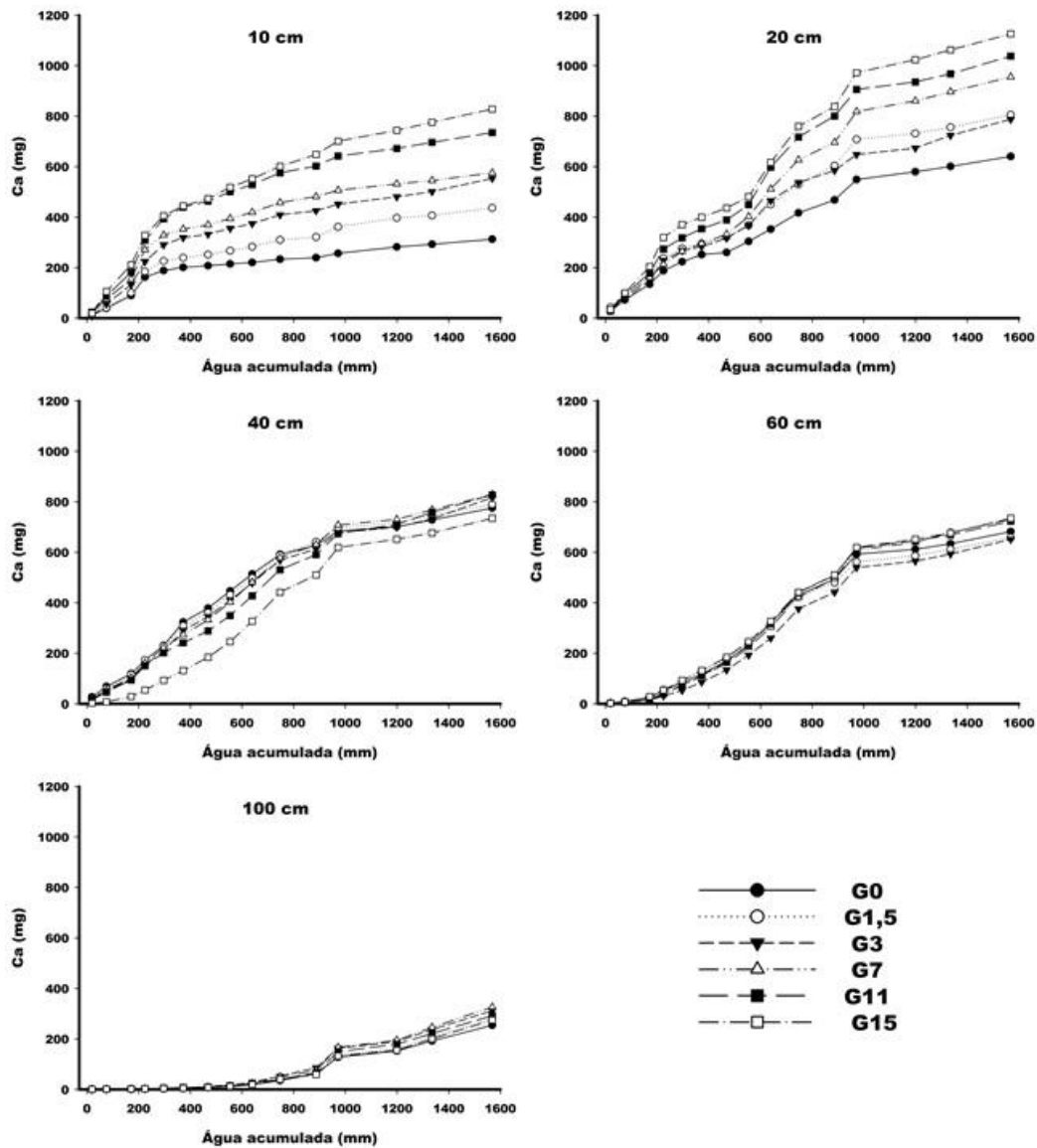
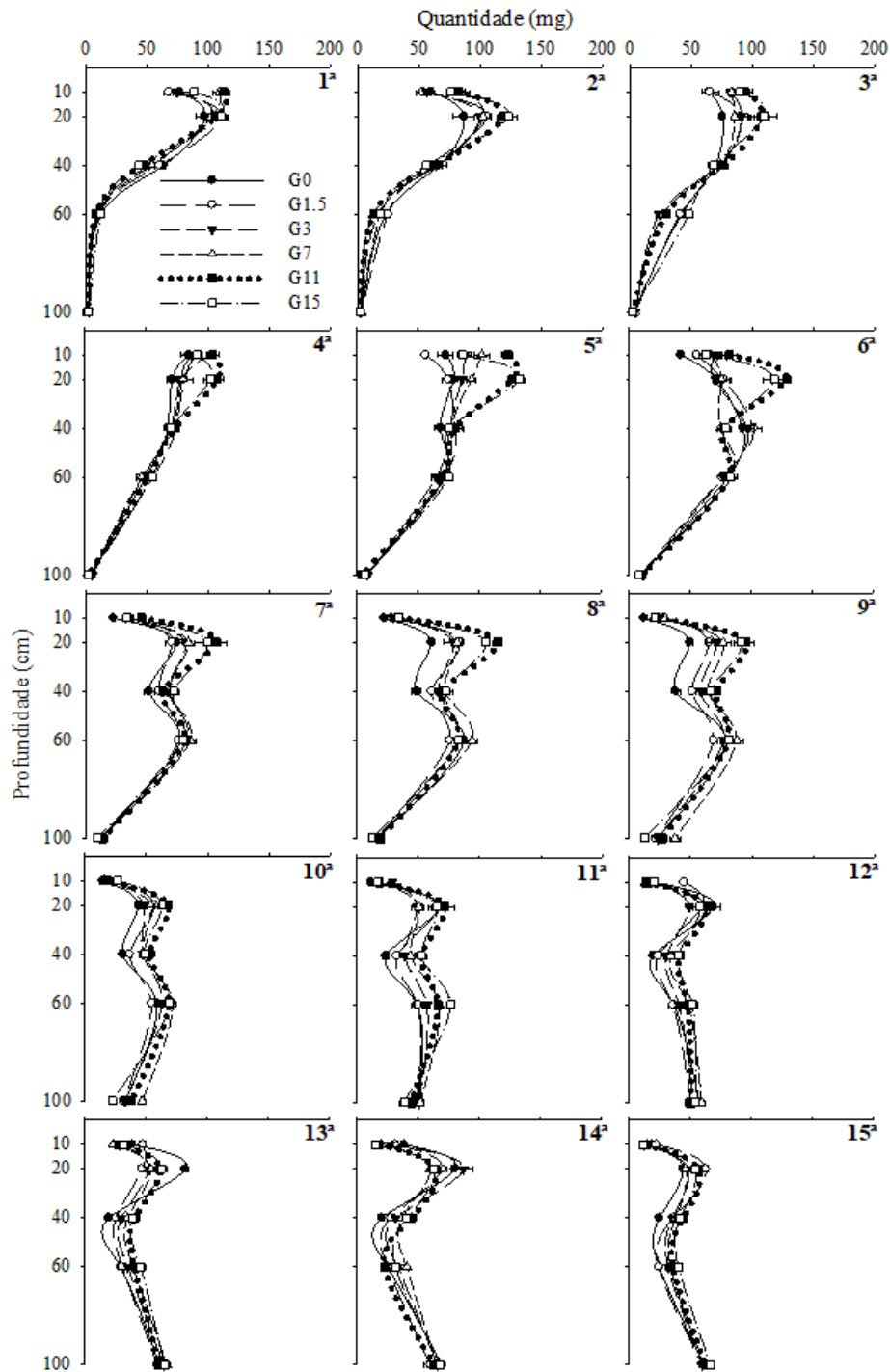


Figura 3: Quantidade acumulada de Ca (mg) nas diferentes profundidades avaliadas de acordo com a quantidade de água (acumulada) aplicada em cada tratamento.
Fonte: Do autor (2021).

Nas colunas de 40, 60 e 100 cm de profundidade, a quantidade de cálcio no efluente não aumentou significativamente, em função das doses de gesso, mas, sim pelo aumento da quantidade de água acumulada que foi aplicada nas colunas. Na coluna com 100 cm de profundidade, começou a aparecer Ca no efluente após o acúmulo de 750 mm de água aplicada, evidenciando os resultados apresentados na figura 2. O fato das doses de gesso não terem afetado significativamente a quantidade de íons encontrada em maiores profundidades pode ser atribuído ao tempo (juntamente com a água acumulada) que não foi suficiente para que o Ca oriundo do gesso aplicado lixiviasse para maiores profundidades. Ramos et al. (2019) e Ferraz (2017), avaliando uma área de campo cultivado com cafeeiro e que recebeu doses elevadas de gesso, perceberam que o Ca desce a maiores profundidades com o tempo avaliando aos 16 e 76 meses após a aplicação do gesso. Outros estudos avaliando o teor de Ca no solo, como Caires et al. (2016), Anderson et al. (2020) e Michalovicz et al. (2019), também relataram o efeito do tempo para a movimentação do Ca para profundidades inferiores.

A figura 4 mostra os resultados encontrados para o magnésio. Na 1ª coleta, os maiores valores de Mg foram encontrados na profundidade de 10 cm, se destacando dos demais tratamentos com maiores doses de gesso (G11 e G15). Esse carregamento inicial do Mg resulta da presença de altas quantidade de Ca que desloca Mg dos sítios de troca do solo, magnésio esse que foi fornecido na correção inicial do solo na forma de óxido, aumentando sua lixiviação e/ou movimentação no perfil (FERRAZ, 2017; CAIRES et al., 2011; TIECHER et al., 2018). A troca de Ca por Mg na maioria dos minerais do solo acontece em forma de processo termodinâmico espontâneo (SPARKS, 2003), em razão, principalmente, de seu maior raio de hidratação, causando assim o desligamento e a liberação do Mg para a solução. A disponibilidade dos nutrientes no solo, além de estar relacionada à concentração, também se relaciona as interações iônicas. Na primeira coleta, foi encontrado Mg em todos os tratamentos inclusive no controle até a profundidade de 60 cm.

Figura 4 – Teores de magnésio no efluente (mg L^{-1}) em 15 coletas realizadas.



Legenda: Teores de magnésio no efluente (mg L^{-1}) em 15 coletas realizadas.

(*) Barras horizontais referem-se ao erro padrão da média.

Fonte: Do autor (2021).

Na segunda coleta, realizada aos 29 dias e com acumulado de 75,20 mm de água, os maiores valores para Mg foram encontrados na profundidade de 20 cm, mostrando a movimentação ocorrendo com o tempo e maior volume de água aplicado. Resultados que corroboram com estudos de Ferraz (2017) e Ramos et al. (2019), onde analisando aplicação de gesso em lavouras comerciais de café relataram o efeito do tempo na descida do cátion para maiores profundidades.

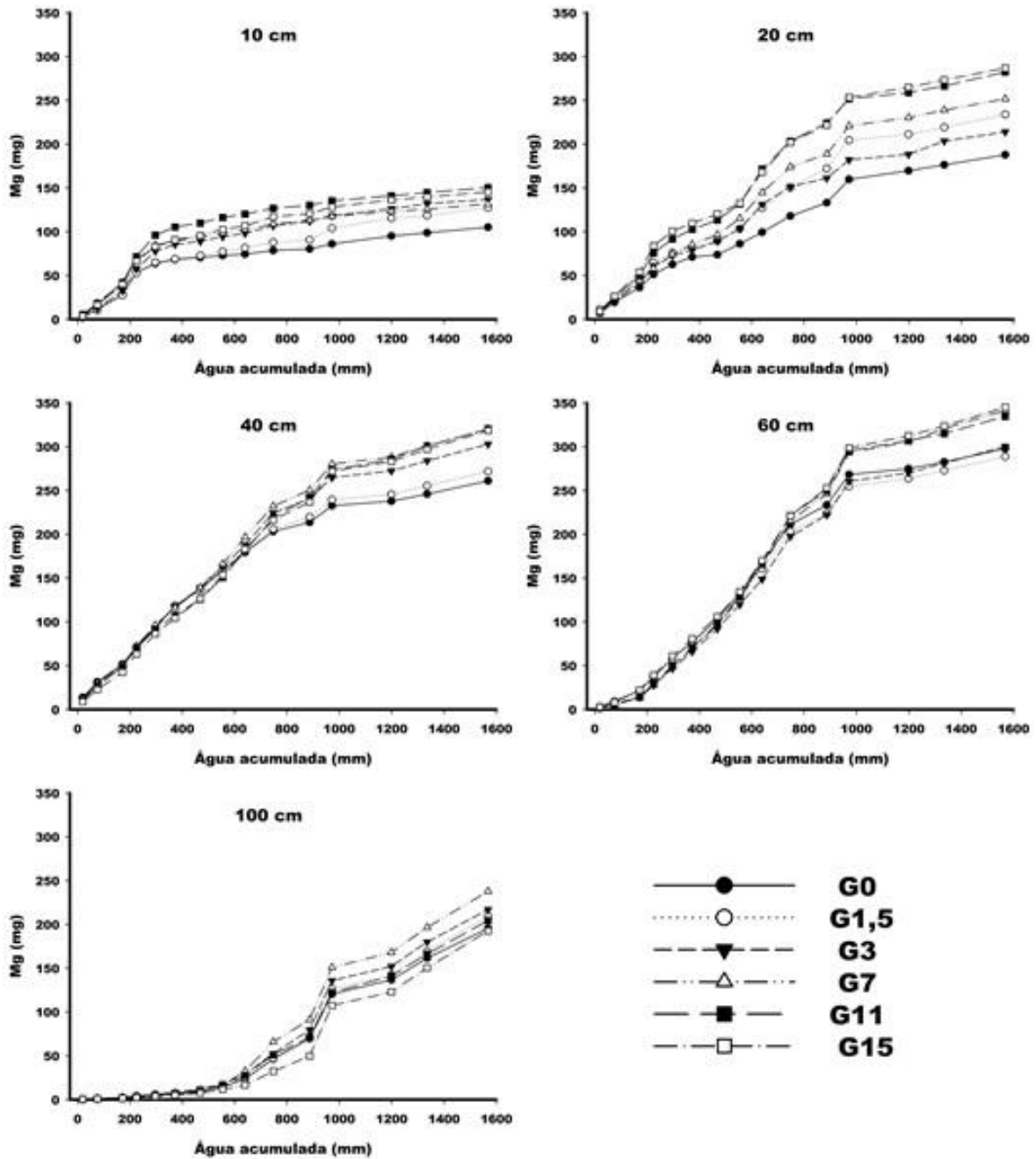
Nas coletas 7, 8 e 9, os tratamentos com as maiores doses de gesso aplicadas apresentaram maiores valores de Mg no efluente coletado das colunas com 10 e 20 cm de profundidade, com maiores valores nas colunas de 20 cm por ter sido aplicado uma maior quantidade de MgO na correção das duas camadas. Esses resultados evidenciam a influência das doses de gesso agrícola na mobilização do Mg para camadas de 20 cm de profundidade, influenciando na distribuição do cátion para maiores profundidades. Resultados encontrados por Ferraz (2017) demonstram esse efeito em um Latossolo muito argiloso sob crescentes doses de gesso agrícola, onde avaliando a solução do solo a quantidade Mg que desceu para camadas mais profundas de acordo com as maiores doses aplicadas. Ramos et al. (2019), avaliando a solução do solo submetido a crescentes doses de gesso (0, 7, 56 t ha⁻¹), relataram que até a profundidade de 85 cm a concentração de Mg aumentou de acordo com as doses aplicadas.

A partir da 6ª coleta (118 dias) já há aumento de magnésio o efluente a 100 cm, resultando numa velocidade média de deslocamento de aproximadamente 0,85 cm dia⁻¹, independente da dose de gesso aplicada. A maior velocidade de deslocamento do magnésio em relação ao cálcio se deve ao maior raio de hidratação do primeiro em relação ao segundo. Resultados semelhantes também foram encontrados por Caires et al. (2011). Ramos et al. (2019), em estudo realizado em Latossolo muito argiloso 16 meses após a aplicação dos tratamentos, relataram a descida do Mg para 235 cm de profundidade independente da dose de gesso aplicada.

Os resultados para a quantidade de magnésio lixiviado, levando em consideração a quantidade acumulada de água aplicada em cada coluna (Figura 5). Na coluna com 10 cm de profundidade, apenas no controle o teor foi menor que os demais tratamentos após, o acúmulo a 1000 mm de água aplicada, sendo que nos demais tratamentos, os teores não se diferiram significativamente. Nas colunas com 20 cm de profundidade a quantidade de Mg aumentou conforme as doses aplicadas mostrando efeito do gesso na mobilização do Mg para o efluente. Os valores encontrados nos acumulados na coluna de 20 cm foram maiores que a coluna de

10 cm devido a maior quantidade de MgO aplicada, por ser uma maior quantidade de solo corrigida.

Figura 5 – Quantidade de magnésio acumulada (mg).



Legenda: Quantidade acumulada de Mg (mg) nas diferentes profundidades avaliadas de acordo com a quantidade de água acumulado aplicada em cada tratamento.

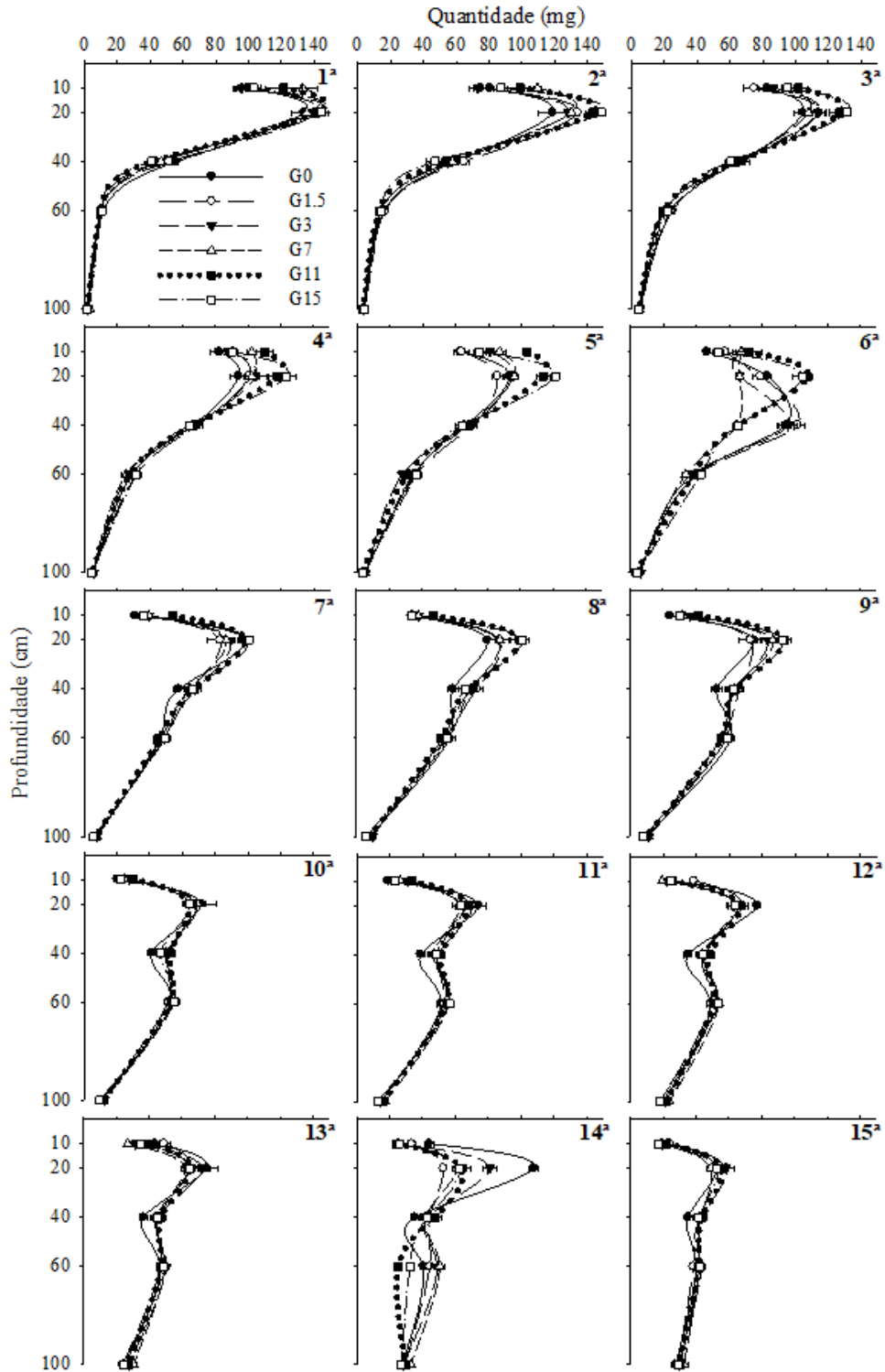
Fonte: Do autor (2021).

Na coluna com 40 cm de profundidade o controle (GO) e o G1,5 apresentaram um acúmulo menor que os demais tratamentos, cuja diferença não foi significativa. Na coluna com 60 cm de profundidade, os tratamentos G0, G1,5 e G3 apresentaram um valor menor de acúmulo de Mg ao final das lixiviações em comparação com os demais. Na coluna com altura de 100 cm começou a aparecer o Mg a partir do acúmulo de 400 mm de água aplicados aumentando conforme foi aplicado mais água, mas não houve diferença entre os tratamentos.

A movimentação do Mg no perfil do solo, influenciada pela adição de gesso agrícola, depende intimamente do teor de argila e da porcentagem de Mg em relação a CTC, da natureza de sua adsorção e a quantidade de água para promover a lixiviação (SYED-OMAR; SUMNER, 1991). Pavan; Bingham; Pratt, (1984), avaliando efeito do gesso em solos arenosos em colunas indeformadas de solo, relataram que com a adição de gesso nos tratamentos os teores de Mg no solo diminuiram até 100 cm. Esse aumento do Mg em todas os tratamentos avaliados tem relação com o predomínio das cargas positivas no solo em profundidade e o maior raio de hidratação do magnésio, que faz com que a água percolada desloque o Mg para camadas mais profundas do solo. Comparativamente ao cálcio, há menos magnésio para sair na coluna de 100 cm, evidencia da maior mobilidade desse cátion em relação ao primeiro.

Na maioria das coletas realizadas, os valores encontrados para o potássio não se diferiram entre os tratamentos ao longo do perfil do solo nas colunas (Figura 6). A troca do K pelo Ca nos sítios de troca do solo, diferentemente do que acontece com Mg pelo Ca, não ocorre de maneira espontânea (SPARKS, 2003), diminuindo a lixiviação do K causada pelo grande aporte de Ca advindo do gesso. Entretanto, esse deslocamento pode acontecer de acordo com o aumento do Ca fornecido por altas doses de gesso causando assim a lixiviação do K ao longo do tempo (ZOCA; PENN, 2017). Apenas na 14ª coleta com 416 dias e 1335,45 mm de água acumulada, os tratamentos G0 e G3 apresentaram maiores valores relativamente às demais doses na profundidade de 20 cm.

Figura 6 – Teores de potássio no efluente (mg L^{-1}) em 15 coletas realizadas.



Legenda: Teores de potássio no efluente (mg L^{-1}) em 15 coletas realizadas.

(*) Barras horizontais referem-se ao erro padrão da média.

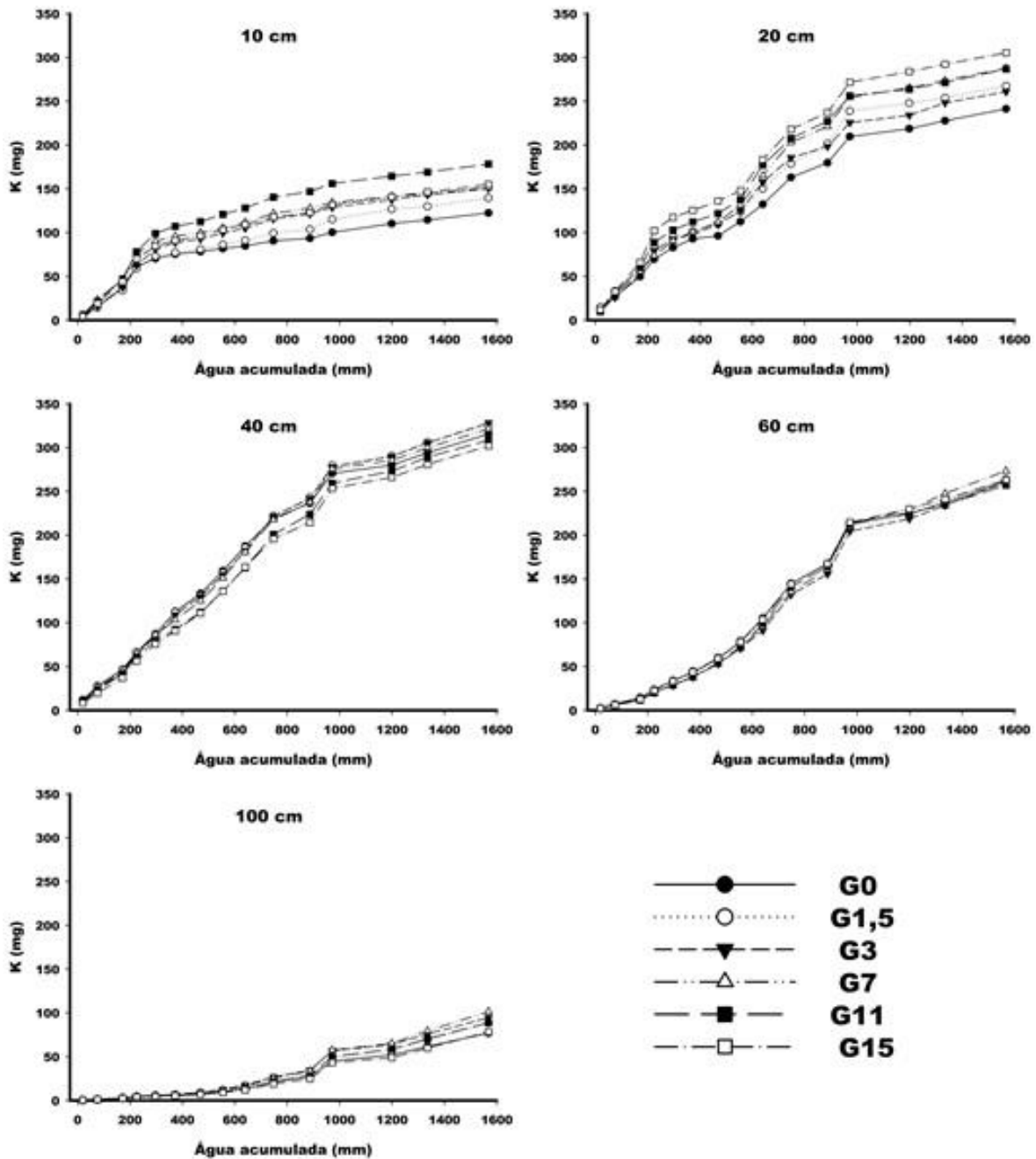
Fonte: Do autor (2021).

Em um contexto geral, em todas as coletas do efluente realizadas houve a movimentação do K para as maiores profundidades, apresentando valores maiores que na 1ª coleta nas profundidades 60 e 100 cm partir da 6ª coleta. Isso mostra uma velocidade de deslocamento do potássio de aproximadamente $0,85 \text{ cm dia}^{-1}$, independente do tratamento aplicado. Comparativamente ao cálcio e magnésio, a velocidade de deslocamento do potássio contraria a posição na série liotrópica, em que esse íon se deslocaria mais facilmente do que o magnésio. Os valores encontrados na profundidade inicial foram diminuindo em todos os tratamentos apresentando os menores valores a partir da 11ª coleta. Resultados semelhantes foram encontrados em trabalhos de Ramos et al. (2013), Ferraz (2017), Ramos et al. (2019) onde em um Latossolo muito argiloso sob altas doses de gesso aplicadas aos 16 e aos 76 meses após a aplicação o teor de K não se alterou conforme o tratamento.

Em experimento conduzido por Zambrosi, et al. (2007), avaliando a solução do solo até 60 cm de profundidade após aplicação de 3, 6 e 9 t ha^{-1} , os autores encontraram resultados que corroboram com os encontrados no presente estudo, visto que houve descida do cátion para camadas mais inferiores, porém, não foi detectada diferença significativa entre os tratamentos.

Os resultados para a quantidade de potássio no efluente, em mg, levando em consideração a quantidade acumulada de água aplicada em cada coluna estão apresentados na figura 7. Os resultados para as colunas com 10 e 20 cm de profundidade foram semelhantes aos encontrados para o Mg (Figura 7) devido ao aumento da concentração de Ca forçar o deslocamento dos outros cátions (Mg e K), onde aumentou conforme a dose aumentou as quantidades e os valores para a coluna com 20 cm foram maiores. À medida que se aumentou o volume de água adicionado nas colunas com 40 e 60 cm de profundidade a quantidade de K aumentou em todos os tratamentos evidenciando o efeito do acúmulo de água na movimentação do nutriente.

Figura 7 – Quantidade de potássio acumulada (mg).



Legenda: Quantidade acumulada de K (mg) nas diferentes profundidades avaliadas de acordo com a quantidade de água acumulado aplicada em cada tratamento.

Fonte: Do autor (2021).

A partir de 400 mm de água acumulado começou a aparecer potássio no efluente na profundidade de 100 cm que aumentou mais expressivamente após 900 mm em todas as doses de gesso. Fatemeh; Khademi, (2017), avaliando efeito do gesso em vasos, demonstraram que

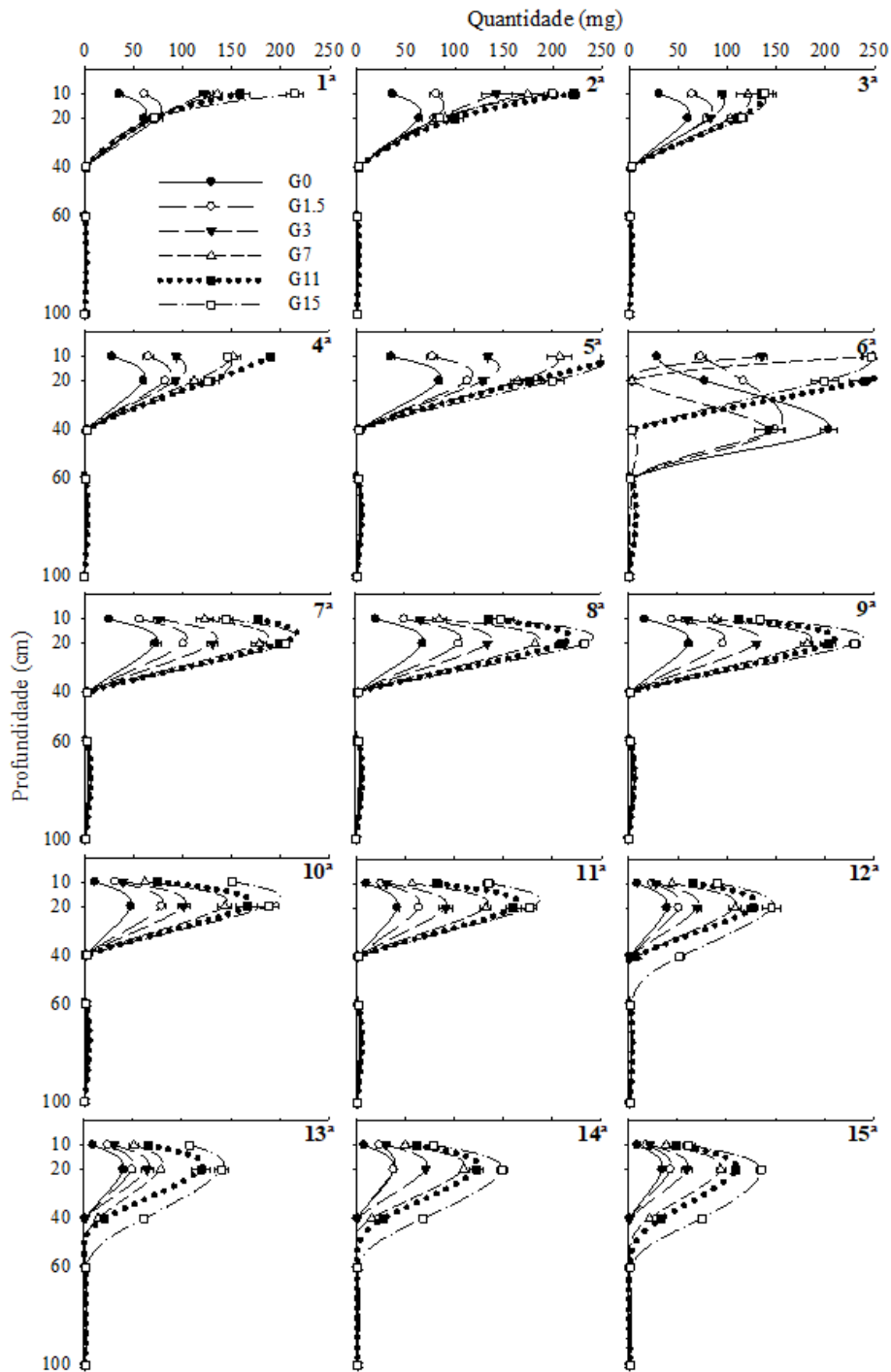
com o aumento da concentração de gesso no vaso de 0 a 25% do peso, afetou a disponibilidade de K para as plantas de alfafa cultivadas. Outros estudos avaliando o teor na solução do solo como Ramos et al. (2019) e Ferraz (2017) com altas doses de gesso também relataram o aumento na descida do K no perfil do solo independente da dose de gesso aplicada, sendo a quantidade influenciada pelo tempo consequentemente acúmulo de água.

Os resultados das análises do efluente para o enxofre estão representados na figura 8. O comportamento do enxofre ao longo do perfil do solo se assemelhou ao comportamento do cálcio apresentando os maiores valores com as maiores doses em profundidades próximas, resultados esperados devido ao gesso agrícola ser basicamente sulfato de cálcio (VAN RAIJ, 2008). Os maiores valores para S encontrados no efluente até a 5ª coleta realizada foram na camada inicial de 10 cm.

A partir da 7ª coleta os maiores teores encontrados foram na profundidade de 20 cm, indicando o tempo e quantidade necessária de água para uma maior dissolução do gesso no solo. Em todas as coletas os valores variaram conforme o tratamento aplicado, sendo o menor o G0 e o maior G15. Ao analisar a figura como um todo, percebe-se que o sulfato é deslocado no perfil com o passar do tempo, ficando mais nítido na 15ª coleta quando, na profundidade de 60 cm, os tratamentos G7, G11 e G15 se destacaram dos demais. Tal fato se deve a maior presença de cargas positivas nas maiores, o enxofre ficou mais retido nas colunas, tendo seus teores praticamente inalterados nos efluentes das colunas de 100 cm ao final do ciclo de amostragem.

Resultados semelhantes em solos cultivados com café foram encontrados por Ferraz (2017) e Ramos et al. (2019), onde analisando a solução de um Latossolo submetido a crescentes doses de gesso relataram o efeito do tempo na ação de descida do S no perfil do solo.

Figura 8 – Teores de enxofre no efluente (mg L^{-1}) em 15 coletas realizadas.



Legenda: Teores de enxofre no efluente (mg L^{-1}) em 15 coletas realizadas.

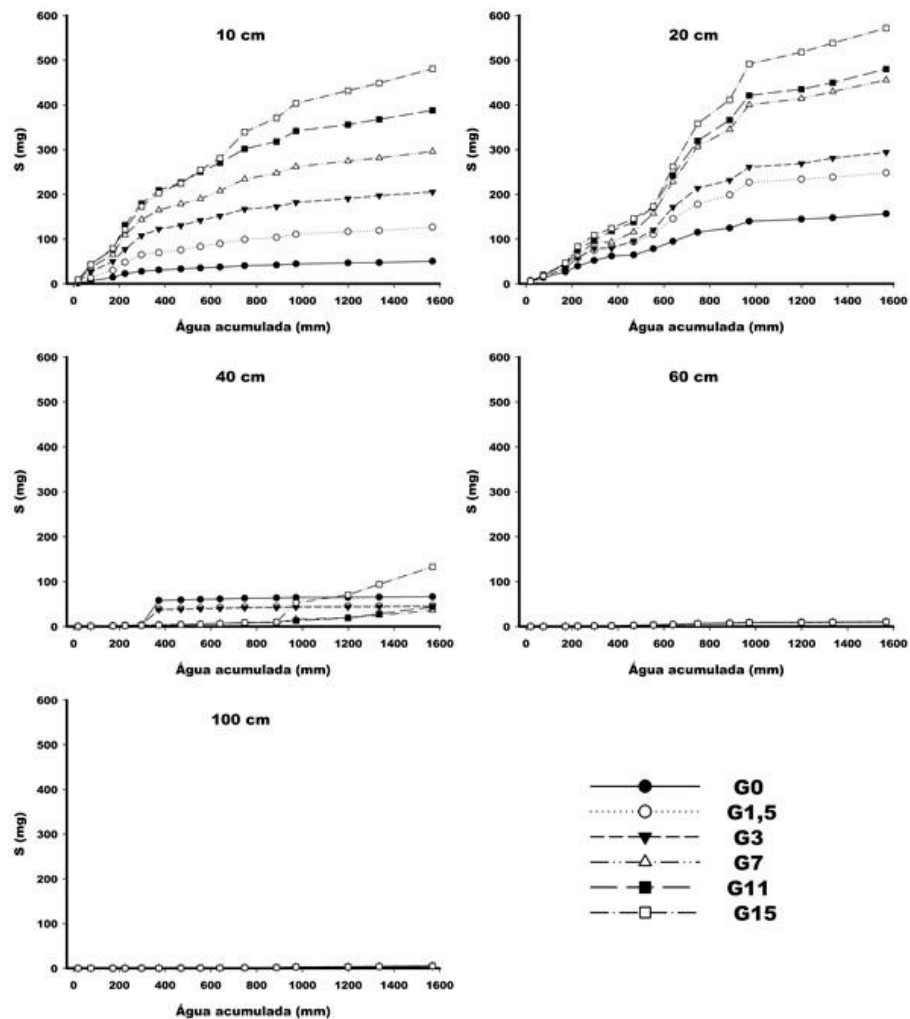
(*) Barras horizontais referem-se ao erro padrão da média.

Fonte: Do autor (2021).

Os resultados para a quantidade de enxofre movimentada, em mg, levando em consideração a quantidade acumulada de água aplicada em cada coluna estão apresentados na

figura 9. Nota-se que em todos os tratamentos os maiores valores de S foram encontrados nas profundidades de 10 e 20 cm, aumentando a quantidade de acordo com o tratamento e a quantidade água aplicada. Variando conforme a dose aplicada, esses valores se deram devido ao grande aporte de enxofre fornecido pelo gesso (ZOCA; PENN, 2017). Na coluna com 40 cm de profundidade o sulfato acumulado para o tratamento G15 começou a se destacar dos demais avaliados a partir do acúmulo 1200 mm de água aplicados.

Figura 9 – Quantidade de enxofre acumulada (mg).



Legenda: Quantidade acumulada de S (mg) nas diferentes profundidades avaliadas de acordo com a quantidade de água acumulado aplicada em cada tratamento.

Fonte: Do autor (2021).

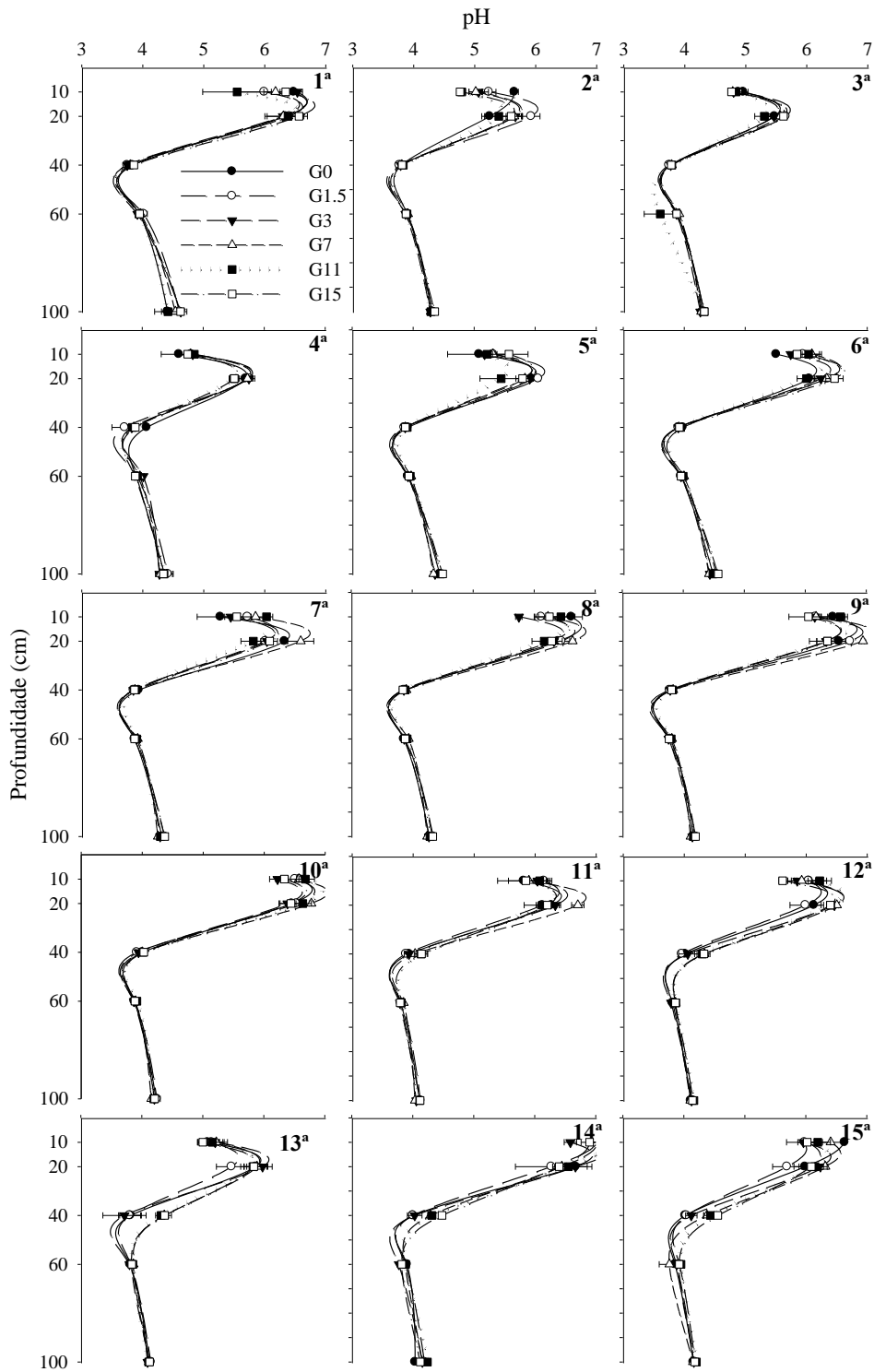
Nas demais profundidades avaliadas 60 e 100 cm a quantidade de S acumulada foi insignificante. Diferentemente dos nutrientes avaliados anteriormente (Ca, Mg e K), o S fica presente no solo na forma de ânion sulfato (SO_4^{2-}) (COSTA, 1980), o que faz com que fique

retido nas cargas positivas do solo e não lixivie a maiores profundidades, com o tempo e quantidade água aplicada.

Trabalhos de Ramos et al. (2019) e Ferraz et al. (2017), avaliando um mesmo Latossolo argiloso aos 16 e 56 meses após a aplicação de gesso reportaram que com o passar do tempo e conseqüentemente um maior volume de água aplicado via chuva, o S desceu para camadas mais abaixo com o passar do tempo indo de 40 cm para 185 cm de profundidade. Crusciol et al. (2016) avaliando em dois anos de cultivo sucessivo um Latossolo sob plantio direto também encontraram influência do tempo/quantidade de água na quantidade de S encontrado nas camadas mais profundas.

Os valores variaram de 3,5 a 7,1 em todas as profundidades e tratamentos (Figura 10). Não foi encontrada diferença entre os tratamentos aplicados inclusive o controle, resultado esperado devido ao gesso ser considerado um sal neutro e a reação do gesso no solo ser apenas a dissolução (VAN RAIJ, 2008). Os maiores valores de pH nos efluentes foram encontrados nas profundidades de 10 e 20 cm, devido essas terem sido corrigidos com óxidos de Ca e Mg.

Figura 10 – Valores de pH dos efluentes.



Legenda: Valores de pH no efluente em 15 coletas realizadas.

(*) Barras horizontais referem-se ao erro padrão da média.

Fonte: Do autor (2021).

Vários trabalhos com gesso encontraram resultados semelhantes (FATEMEH; KHADEMI, 2017; CRUSCIOL et al. 2016; RAMPIM et al. 2011; ZANDONÁ et al., 2015; MICHALOVICZ et al., 2014; CRUSCIOL et al., 2014; SANTOS et al., 2013; CAIRES et al., 2011) independente da dose aplicada. Porém, alguns trabalhos como o de Ramos et al. (2013) relataram baixa redução do pH em relação ao controle, resultados que foram encontrados por outros autores como Leite et al. (2012), e que ocorrem provavelmente pela hidrólise do Al^{3+} que é deslocado das cargas negativas do solo pelo Ca^{2+} .

Em contrapartida, alguns autores notificaram um pequeno aumento do pH do solo causado pelo gesso aplicado que foi explicado devido a reação de substituição na superfície dos coloides, onde o SO_4^{2-} oriundo do gesso desloca o OH^- para solução do solo, causando assim a neutralização parcial da acidez do solo, elevando o pH (REEVE e SUMNER, 1972).

Os valores de condutividade elétrica do efluente estão apresentados na figura 11. No geral os valores para condutividade nos efluentes coletados não se diferenciou entre os tratamentos aplicados, sendo os maiores valores encontrados nas primeiras coletas nas profundidades de 10 e 20 cm. No geral em todos os tratamentos ocorreu uma diminuição com o passar do tempo e aumento de água aplicada implicando na lixiviação dos elementos que estavam disponíveis na solução do solo.

Figura 11 – Valores de condutividade elétrica (mS cm^{-1}) dos efluentes.

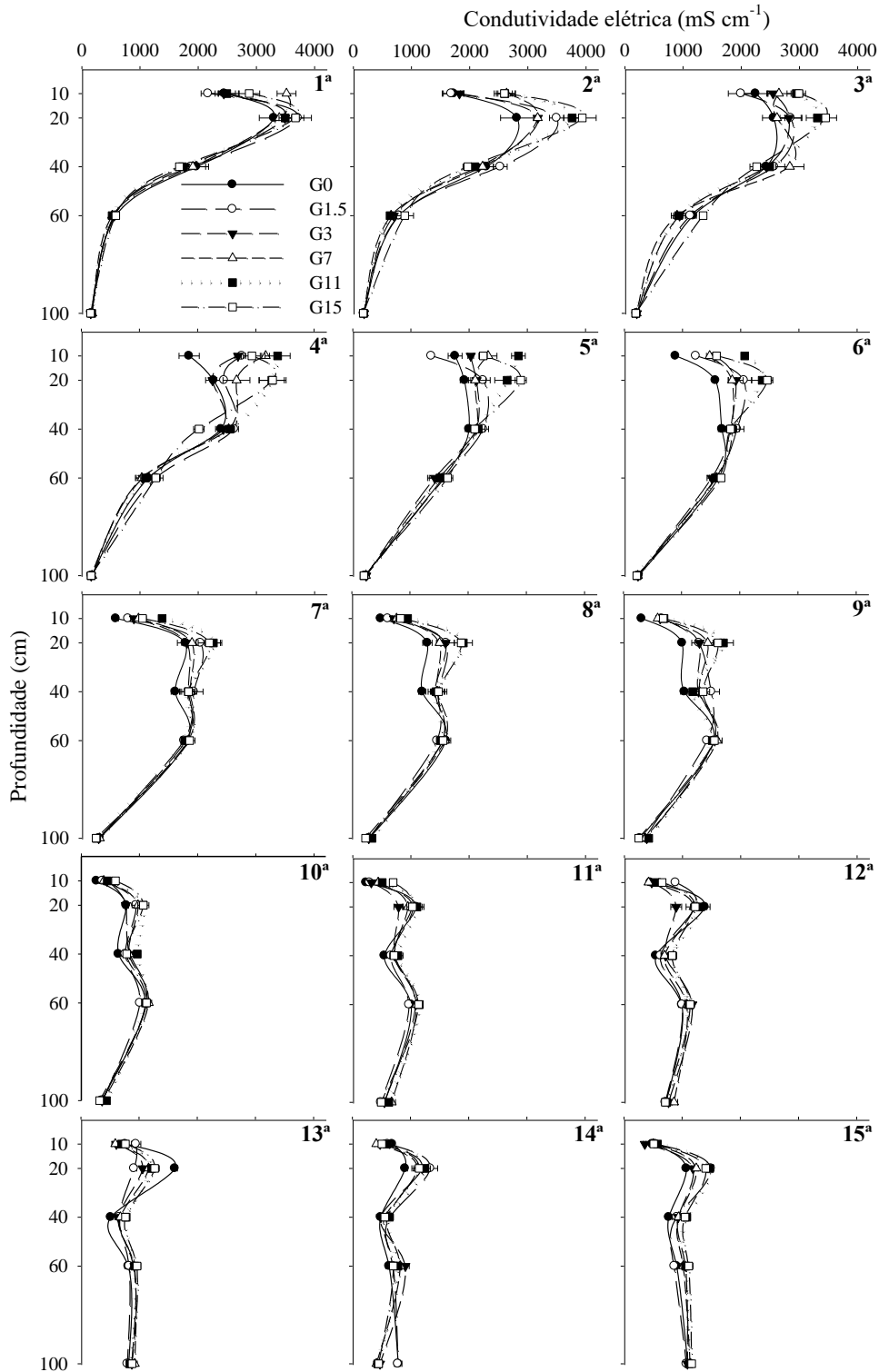


Figura 11: Condutividade elétrica no efluente (mS cm^{-1}) em 15 coletas realizadas.

(*) Barras horizontais referem-se ao erro padrão da média.

Fonte: Do autor (2021).

Tavares Filho et al. (2012) avaliando a condutividade elétrica em extrato coletado a partir de colunas de solo tratadas com gesso agrícola, perceberam que com o aumento da lâmina de água aplicada ocorreu a diminuição dos valores de condutividade elétrica, resultados que corroboram com os encontrados no presente trabalho onde, à medida que aumentou o volume de água aplicada, os valores de condutividade elétrica do lixiviado foram diminuídos, em razão da diluição do material lixiviado.

As quantidades de Ca, Mg, K e S, em mg, que lixiviaram por dia (média calculada do acumulado ao final dos 510 dias) em cada profundidade (Tabela 3). Para o cálcio, na média de todas as profundidades, a quantidade lixiviada por dia aumentou conforme a dose de gesso aplicada. As maiores quantidades lixiviadas por dia foram encontradas nos tratamentos G11 e G15, em quase todas as profundidades avaliadas. As menores quantidades lixiviadas por dia foram na profundidade de 100 cm, onde o Ca demorou mais a aparecer no efluente. Para o enxofre, as maiores quantidades lixiviadas foram encontradas na profundidade de 20 cm, sendo que, na média das profundidades, os valores aumentaram de acordo com as doses de gesso aplicadas. Nas maiores profundidades (60 e 100 cm), a quantidade por dia lixiviada foi praticamente insignificante, devido ao enxofre não ter descido para essas profundidades, como mostrado na figura 9.

Tabela 3 – Quantidades de Ca, Mg, K e S ($\mu\text{mol}_c \text{ dia}^{-1}$) lixiviadas nos diferentes tratamentos (profundidades e doses de gesso).

Tratamentos						
Ca ($\mu\text{mol}_c \text{ dia}^{-1}$)						
Profundidade	G0	G1,5	G3	G7	G11	G15
10	30,64	42,77	54,26	56,42	72,04	81,14
20	62,76	78,96	77,15	93,66	101,74	110,37
40	76,02	77,43	80,09	81,23	81,09	72,01
60	66,85	64,48	63,83	71,65	70,89	72,01
100	24,92	27,66	30,58	31,99	28,64	26,96
Médias	52,24	58,26	61,18	66,99	70,88	72,49
S ($\mu\text{mol}_c \text{ dia}^{-1}$)						
	G0	G1,5	G3	G7	G11	G15
10	3,08	7,74	12,56	18,08	23,72	29,39
20	9,57	15,18	17,97	27,86	29,37	34,96

40	4,06	2,89	2,75	2,19	2,65	8,13
60	0,66	0,61	0,60	0,66	0,66	0,63
100	0,26	0,30	0,33	0,34	0,31	0,29
Médias	3,53	5,34	6,84	9,82	11,34	14,68
Mg ($\mu\text{mol}_e \text{ dia}^{-1}$)						
	G0	G1,5	G3	G7	G11	G15
10	8,59	10,41	11,17	10,75	12,29	11,89
20	15,35	19,11	17,48	20,56	23,07	23,43
40	21,32	22,21	24,75	26,15	26,17	26,01
60	24,34	23,59	24,55	27,90	27,34	28,19
100	15,97	17,09	17,72	19,43	16,71	15,74
Médias	17,11	18,48	19,13	20,96	21,12	21,05
K ($\mu\text{mol}_e \text{ dia}^{-1}$)						
	G0	G1,5	G3	G7	G11	G15
10	6,15	7,01	7,57	7,62	8,96	7,79
20	12,13	13,45	13,12	14,46	14,42	15,35
40	15,85	16,35	16,51	16,15	15,50	15,18
60	13,16	13,27	13,10	13,74	12,93	13,24
100	3,86	4,45	4,76	5,10	4,47	3,94
Médias	10,23	10,91	11,01	11,42	11,26	11,10

Fonte: Do Autor(2021).

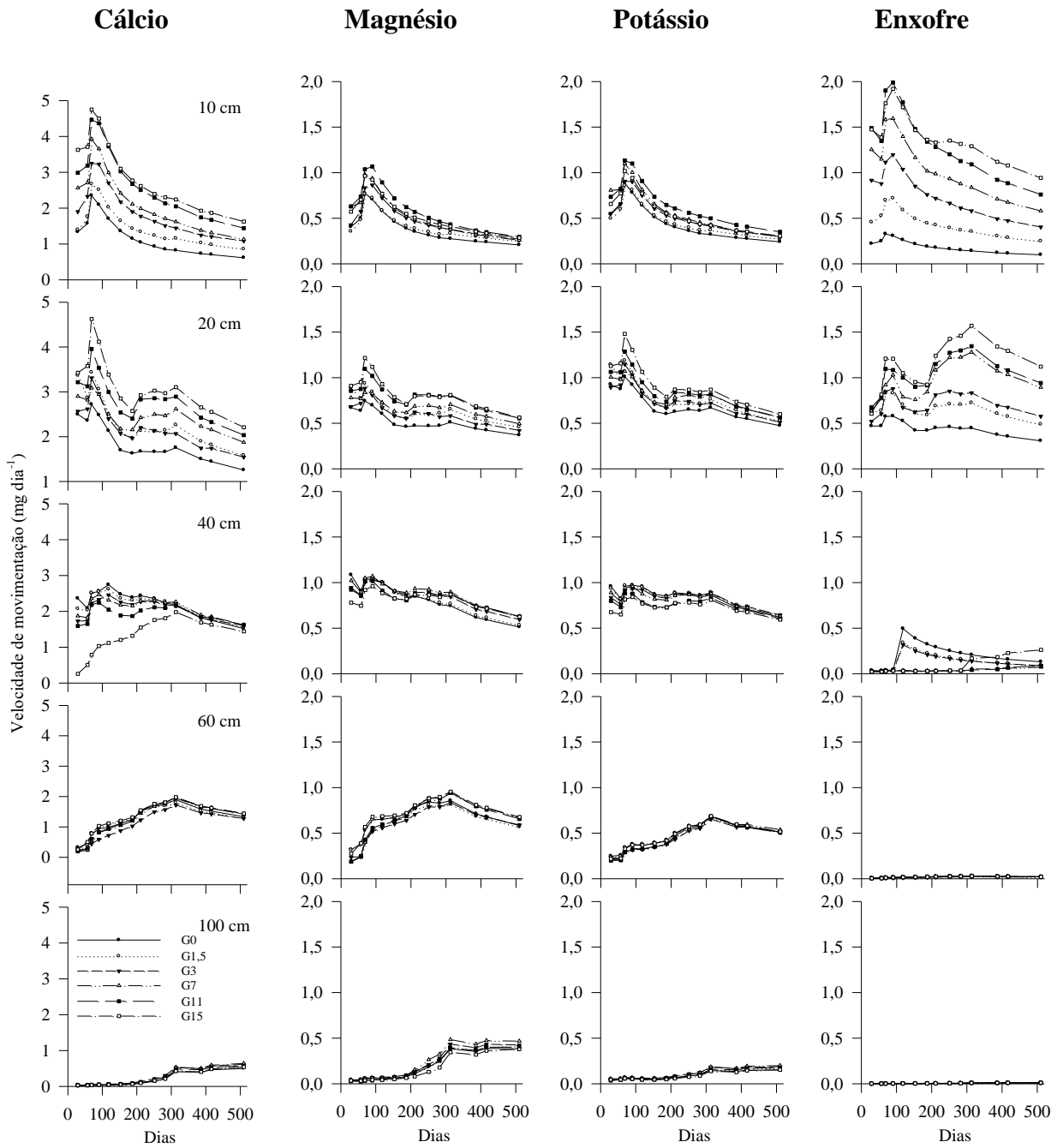
As quantidades de magnésio lixiviadas por dia, na média das profundidades, aumentaram com o aumento das doses de gesso aplicadas, sendo os maiores valores verificados na profundidade de 60 cm. Esse resultado ocorreu devido ao maior acúmulo de magnésio lixiviado nessa profundidade (Figura 5). As quantidades lixiviadas por dia de potássio apresentaram os maiores valores na profundidade de 40 cm.

Ao se comparar as quantidades ($\mu\text{mol}_e \text{ dia}^{-1}$) de cada elemento avaliado que desceu em média, observa-se, no geral, a seguinte ordem crescente: $S < K \sim Mg < Ca$. Isso mostra que o Ca foi o cátion que mais se movimentou, apesar de ser o mais retido dentre os cátions avaliados, segundo a série liotrópica. Isso ocorreu devido a lei de ação das massas, tendo em vista que o Ca foi adicionado não somente pela correção das camadas superficiais com óxidos de Ca e

Mg, mas, também pelas doses de gesso aplicadas. Ao contrário do Ca, o S foi o elemento que menos se movimentou, mesmo tendo sido aplicado juntamente com as doses de gesso. Como já mencionado anteriormente, por se tratar de um ânion, este elemento foi retido em cargas elétricas positivas que ocorrem normalmente em camadas mais profundas de Latossolos, devido à baixa influência da matéria orgânica e a presença dos óxidos de Fe e Al, os quais exibem cargas positivas devido aos altos valores de ponto de carga zero (PCZ).

A quantidade de Ca, Mg, K e S (mg dia^{-1}) lixiviadas nos diferentes tratamentos aplicados estão apresentadas na figura 12. As maiores velocidades foram encontradas para todos os íons nos primeiros dias nas profundidades de 10 e 20 cm, sendo maior à medida que se aumentou a dose de gesso aplicada. Na profundidade de 100 cm a velocidade aumentou de forma mais relevante para Ca, Mg e K a partir de 300 dias do início do experimento, com exceção o S que foi encontrado até a profundidade de 40 cm.

Figura 12 – Quantidade de Ca, Mg, K e S (mg dia^{-1}) lixiviadas.



Legenda: Quantidades de Ca, Mg, K e S (mg dia^{-1}) lixiviadas nos diferentes tratamentos (profundidades e doses de gesso).

Fonte: Do autor (2021).

4 CONCLUSÃO

As doses de gesso estudadas influenciaram a mobilização dos nutrientes Ca, Mg, K e S principalmente nas camadas superficiais do solo (colunas de 10 e 20 cm de profundidade). Nas profundidades inferiores, a influência das doses de gesso foi baixa, sendo menor ainda para as maiores profundidade. Exceção a isso, foi para o Mg, o qual foi lixiviado em maiores quantidades nas colunas com 40 e 60 cm de profundidades, quando tratadas com as maiores doses de gesso aplicadas.

À medida que se aumentaram a quantidade acumulada de água aplicada, a quantidade dos íons avaliados aumentou no efluente, sendo esse aumento na coluna de profundidade de 100 cm observado apenas após uma elevada quantidade de água aplicada, com exceção para o S, o qual foi carregado apenas até 40 cm.

Independente da dose de gesso aplicada os cátions Ca, Mg e K, se moveram no perfil do solo a uma velocidade de 0,40, 0,85 e 0,85 cm dia⁻¹ respectivamente. No geral, as quantidades dos elementos que se movimentaram seguiram a ordem crescente: S<K~Mg<Ca, e o pH do efluente não foi influenciado pelas doses de gesso. A condutividade elétrica do efluente diminuiu conforme se aumentou a quantidade acumulada de água aplicada.

REFERÊNCIAS

- ALCORDO, I. S., AND RECHCIGL, J. E. (1993). Phosphogypsum in agriculture: A review. **Advances in Agronomy**. 49, 55–118
- ANDERSON, G.C.; PATHAN, S.; EASTON, J.; HALL, D.J.M.; SHARMA, R. Short- and Long-Term Effects of Lime and Gypsum Applications on Acid Soils in a Water-Limited Environment: 2. **Soil Chemical Properties**. **Agronomy** v. 10, 2020.
- CAIRES, E. F. et al. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 275-286, mar./abr. 2003.
- CAIRES et al. Surface application of gypsum in low acidic Oxisol under no-till cropping system. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 68, n. 2, p. 45-53, mar./abr. 2011.
- CAIRES E F, ZARDO FILHO R, BARTH G, JORIS H A W. Optimizing nitrogen use efficiency for no-till corn production by improving root growth and capturing NO₃-N in subsoil. **Pedosphere**. 26(4): 474–485.2016.
- COSTA, C.A.S. **Mineralização do S orgânico e adsorção de sulfato em solos**. **Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo)** – Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.1980.
- CREMON, C.; ROSA JÚNIOR, E.J.; SERAFIM, M.E. & ONO, F.B. Análise micromorfométrica de agregados de um Latossolo Vermelho distroférrico em diferentes sistemas de manejo. **Acta Scientiarum Agronomy**., 31:139-146, 2009.
- CRUSCIOL et al. Soil fertility, plant nutrition, and grain yield of upland rice affected by surface application of lime, silicate, and phosphogypsum in a tropical no-till system. **Catena**, **Amsterdam**, v. 137, p. 87–99, Feb. 2016.
- CRUSCIOL, C. A. C. et al. Effects of surface application of calcium magnesium Silicate and gypsum on soil fertility and sugarcane yield. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 6, p. 1843-1854, nov./dez. 2014.
- FATEMEH S. S.; KHADEMI, H.: Effect of gypsum on potassium and iron release from phlogopite to alfalfa, **Journal of Plant Nutrition**, 2017.
- FERRAZ, R. M. **Efeitos a longo prazo da aplicação de altas doses de gesso nas características químicas em perfil de latossolo cultivado com café**. (2017). 50p Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2017.
- GOMES, L., SIMÕES, S. J. C., NORA, E. L. D., SOUSA-NETO, E. R., FORTI, M. C., AND OMETTO, J. P. H. B. Agricultural expansion in the Brazilian Cerrado: Increased soil and

nutrient losses and decreased agricultural productivity. **Land Use and Food Systems Interactions in South America**, 8, 12, 2019.

GOULDING J. **Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom Soil Use and Management**, September 2016, 32, 390–399 2016.

GUIMARÃES, P. T. G. O uso do gesso agrícola na cultura do cafeeiro. In: **SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA**, 2., 1992, Uberaba. Anais... Uberaba: 1992. p. 190.

LEITE, M.J.H.; SANTOS, R.V.; GOMES, A.D.V. & VITAL, A.F.M. Aplicação de corretivos e crescimento de oleaginosas em solos salinizados do semiárido. **Revista Verde**, 7:87-95, 2012.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; RAMOS, S. J. The saga of the agricultural development of the Brazilian Cerrado. **Electronic International Fertilizer Correspondent**, n. 32, p. 29-57, 2012.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. S. G. A career perspective on soil management in the cerrado region of Brazil. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 137, p. 1-72, 2016.

MARQUES, E. S.; FAQUIN, V.; GUIMARÃES, P. T. G. Teores foliares de nutrientes no cafeeiro (*Coffea arabica* L.) em resposta a calcário e gesso. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 23, n. 1, p. 140-151, jan./mar. 1999.

MICHALOVICZ, L. et al. Soil fertility, nutrition and yield of maize and barley with gypsum application on soil surface in no-till. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 5, p. 1496-1505, set./out. 2014.

NEIS, L. et al. Gesso agrícola e rendimento de grãos de soja na região do sudoeste de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 409-416, mar./abr. 2010.

NORA, D. AMADO T.J.C. NICOLOSO R.S. MAZUCO A.C.B. PICCIN M. Mitigation of the Gradient of chemical properties in the rooting zone of dystrophic Oxisols by gypsum and lime inputs under a no-till system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2017.

PAULETTI, V. et al. Long-term effects of the application of gypsum and lime in a no-till system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 2, p. 495–505, mar./abr. 2014.

PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T. & PRATT, P.F. Redistribution of exchangeable calcium, magnesium and aluminum following lime and gypsum applications to a Brazilian Oxisol. **Soil Society of America Journal.**, 48:33-38, 1984.

QUAGGIO, J. A. Acidez e calagem em solos tropicais. Campinas: **Instituto Agrônomo de Campinas**, 2000.

RAMOS, B. Z. et al. Ionic speciation in a dystrophic red latosol under coffee crop and high doses of gypsum. **Coffee Science**, Lavras, v. 14, n. 3, p. 281 - 290, jul./sep. 2019.

RAMOS, B. Z. et al. Doses de gesso em cafeeiro: influência nos teores de cálcio magnésio potássio e pH na solução de um Latossolo Vermelho Distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa**, v. 37, n. 4, p. 1018-1026, jul./ago. 2013.

RAMPIM, L. et al. Atributos químicos de solo e resposta do trigo e da soja ao gesso em sistema semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1687-1698, set./out. 2011.

REEVE, N. G.; SUMNER, M. E. Amelioration of subsoil acidity in natal oxisols by leaching surface applied amendments. **Agrochimophysics, Pretoria**, v. 4, n. 1, p. 1–6, jan. 1972.

SANTOS, R. L. et al. Produção de capim elefante e movimentação de cátions em função de gesso mineral. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 10, p. 1030–1037, out. 2013.

SERAFIM, M. E. et al. Sistema conservacionista e de manejo intensivo do solo no cultivo de cafeeiros na região do alto São Francisco, MG: um estudo de caso. **Bioscience Journal, Uberlândia**, v. 27, n. 6, p. 964-977, nov./dez. 2011.

SILVA, F. M. et al. Using proximal sensors to assess pedogenetic development of Inceptisols and Oxisols in Brazil. **Geoderma Regional**. 2022.

SHAMSUDDIN, J.: CHE FAUZIAH. Weathered tropical soils: the Ultisols and Oxisols. **University Putra Malaysia Press**, 2010.

SHETTY, R. PRAKASH, N.B. Effect of different biochars on acidoil and growth parameters of rice plants under aluminium toxicity. **Nature**, 2020.

SOUSA, D.M.G. & LOBATO, E., eds. Cerrado: Correção do solo e adubação. Planaltina, Embrapa Cerrados, 2004. 416p.

SOUSA, D.M.G.; RITCHEY, K.D. Uso de gesso no solo de cerrado. In: **SEMINÁRIO SOBRE O USO DE FOSFOGESSO NA AGRICULTURA**, 1., Brasília, 1986. Anais. Brasília, EMBRAPA, DDT, 1986. p.119-144.

SOUZA, D. M. G.; LOBATO, S.; REIN, T. A. Uso de gesso agrícola nos solos do Cerrado. Planaltina: **Embrapa Cerrados**, 2005.

SPARKS, D.L. Environmental Soil Chemistry. **Academic Press**, San Diego, CA, USA, 2003.

SYED-OMAR, S.R., SUMNER, M.E. Effect of gypsum on soil potassium and magnesium status and growth of alfalfa. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.** 22, 2017–2028, 1991.

TAVARES-FILHO, A. N; Maria de F. C. Barros, M.F. Rolim, M.M; Silva E. F.F Incorporação de gesso para correção da salinidade e sodicidade de solos salino-sódicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.3, p.247–252, 2012.

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMA, G.K.; FONTANA, A. TEIXEIRA, W.G.– **Manual de métodos de análise do solo. 3. ed.** Brasília: Embrapa, 573 p. 2017.

TIECHER T, PIAS OHC, BAYER C, MARTINS AP, DENARDIN LGO, ANGHINONI I. Crop response to gypsum application to subtropical soils under no-till in Brazil: a systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 42: e0170025, 2018.

VAN RAIJ, B. **Gesso na agricultura. Campinas: Instituto Agronômico**, 2008.

WEBER, O.L.S.; CHITOLINA, J.C.; CAMARGO, O.A. & ALLEONI, L.R.F. Cargas elétricas estruturais e variáveis de solos tropicais altamente intemperizados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 29:867-873, 2005.

ZAMBROSI, F. C. B.; ALLEONI, L. R. F.; CAIRES, E. F. Aplicação de gesso agrícola e especiação iônica da solução de um Latossolo sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 1, p. 110-117, fev. 2007.

ZANDONÁ, R. R. et al. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, n. 2, p. 128-137, abr./jun. 2015.

ZOCA, S. M.; PENN, C. An important tool with no instruction manual: a review of gypsum use in agriculture. **Advances in Agronomy**, v. 144, p. 1-44, 2017.

ARTIGO 2: Influência da aplicação de gesso no perfil de um Latossolo argiloso:

Disponibilidade de nutrientes e desenvolvimento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*)

Norma NBR 6022 (ABNT 2003) (Versão preliminar)

Raul Magalhães Ferraz¹, Guilherme Lopes¹

¹ Departamento de Ciências dos Solos, Universidade Federal de Lavras (UFLA), MG, Brasil

RESUMO

A agricultura brasileira nas últimas décadas cresceu muito nas áreas de cerrado. Nessas áreas, ocorrem predominantemente os Latossolos, solos que apresentam baixa fertilidade natural, porém, apresentam declividade e características físicas que os tornam propícios à mecanização, sendo, por isso, considerados de alto potencial produtivo. Entretanto, a fertilidade desses Latossolos precisa ser construída por meio da aplicação de corretivos e outros insumos. Como os problemas relacionados à baixa fertilidade natural ocorrem ao longo de todo o perfil do solo, notadamente pela presença de alumínio, o uso do gesso agrícola (um subproduto da indústria de ácido fosfórico) vem ganhado cada vez mais espaço por apresentar efeitos positivos no crescimento radicular em profundidade. O presente trabalho teve como objetivos: i) avaliar a disponibilidade de Ca, Mg, K e S em amostras de solos coletadas em diferentes profundidades, até 100 cm, em colunas que foram incubadas com doses de gesso durante 510 dias e que receberam uma quantidade acumulada de água de 1568,40 mm; e ii) avaliar o efeito das doses de gesso na produção de feijoeiro (produção de massa seca, grãos, teores nutricionais e distribuição do sistema radicular em profundidade). O experimento foi realizado em casa de vegetação com colunas de 10, 20, 40, 60, 100 cm de profundidade, as quais receberam 0, 1,5, 3, 7, 11, 15 t ha⁻¹ de gesso com três repetições. Após um período de aproximadamente 510 dias de incubação, amostras de solos de diferentes profundidades foram coletadas e analisadas e, na sequência, nas colunas de 100 cm de profundidade, foi cultivado o feijoeiro até a produção de grãos, sendo avaliado, ao final do seu ciclo, a produção de matéria seca da planta, de grãos, teores nutricionais e distribuição de raízes ao longo das diferentes profundidades. Os teores de Ca, Mg, K e SO₄²⁻ foram influenciados pelas doses de gesso, sendo esse efeito mais pronunciado até a profundidade de 40-60 cm. A produção de matéria seca da parte aérea do feijoeiro aumentou até a dose de 10,48 t ha⁻¹, enquanto a matéria seca dos grãos aumentou de forma linear em função das doses de gesso testadas. Os teores de Ca e S, tanto na parte aérea como nos grãos, aumentaram na medida em que se aumentaram as doses de gesso aplicadas. O inverso foi observado para os teores de Mg e K. A aplicação de gesso propiciou um aumento no crescimento de raízes do feijoeiro, principalmente nas camadas inferiores (60-80 e 80-100 cm), sendo que a produção total de raízes aumentou de forma quadrática em função das doses de gesso aplicadas, até a dose de 15 t ha⁻¹.

Palavras-chave: gesso agrícola, condicionador de solo, lixiviação, balanço de nutrientes, produtividade do feijoeiro, crescimentos raízes.

ABSTRACT

Brazilian agriculture in recent decades has expanded to cerrado areas. In these areas, there are predominantly Latosols, soils that have low natural fertility, however, they have slope and physical characteristics that make them suitable for mechanization, being, therefore, considered of high productive potential. However, soil fertility of these Latosols needs to be built through the application of amendments and other inputs. Due to problems related to low natural soil fertility occur throughout the soil profile, notably the presence of high aluminum amounts, the use of agricultural gypsum (a by-product of the phosphoric acid industry) has been proposed due to its positive effects on plant root growth. The present study aimed to: i) evaluate the availability of Ca, Mg, K, and S in soil samples collected at different depths, up to 100 cm, in columns that were incubated with doses of gypsum for 510 days and that received an accumulated amount of water of 1568.40 mm; and ii) assess the effect of gypsum doses on common bean production (production of dry mass, grains, nutritional contents and distribution of the plant root system). The experiment was carried out in a greenhouse with columns of 10, 20, 40, 60, 100 cm depth, which received 0, 1.5, 3, 7, 11, 15 t ha⁻¹ of gypsum with three replicates. After a period of approximately 510 days of incubation, soil samples from different depths were collected and analyzed. Then, in columns of 100 cm depth, common bean plants were grown until grain production, being evaluated, at the end of its cycle, plant dry matter production, grain production, nutritional content and root distribution along the different depths. Calcium, Mg, K, and SO₄²⁻ contents were influenced by the gypsum doses, this effect being more pronounced up to 40-60 cm depth. Common bean shoot dry matter production increased up to the rate of 10.48 t ha⁻¹, while grain dry matter increased linearly upon increasing the tested gypsum doses. Levels of Ca and S, both in shoots and grains of common bean, increased with increasing the doses of gypsum applied. Opposite results were observed for Mg and K contents. Gypsum application provided an increase in common bean root growth, mainly in the deepest soil layers (60-80 and 80-100 cm), and the total root production increased quadratic upon increasing the 15 t ha⁻¹ gypsum doses applied.

Keywords: agricultural gypsum, soil conditioner, leaching, nutrient balance, common bean yield, root growth.

1 INTRODUÇÃO

Os aumentos na produção de alimentos no mundo, juntamente com a conservação dos ecossistemas, desafiam constantemente a relação entre demanda mundial por alimentos e produção de forma sustentável. Nesse contexto, cada vez mais torna-se necessário o emprego de técnicas de manejo que aumentem a produtividade das culturas agrícolas (LOPES; GUILHERME, 2016) minimizando a necessidade de abertura de novas áreas de plantio. No Brasil, a produção de alimentos em áreas de cerrado, que eram consideradas improdutivas no início do século passado, vem aumentando cada dia mais, em razão do emprego de novas tecnologias (insumos e manejo).

Os solos predominantes na região do cerrado brasileiro são os Latossolos, solos com baixa fertilidade natural, porém praticamente sem limitações físicas ao cultivo (RODRIGUES; SILVA, 2020), o que os tornam propícios para suportar altas produtividades das culturas com a devida correção, construção e manutenção da fertilidade do solo. Os Latossolos são ácidos e pobres em nutrientes em todo o perfil (RODRIGUES; SILVA, 2020). Para a correção da acidez do solo, o uso de calcário incorporado na camada arável (camadas superficiais 20-30 cm) resultados é indispensável (CARVALHO; NASCENTE, 2018). Contudo, o calcário não tem impacto nas camadas mais profundas dos solos. Nesse caso, o gesso agrícola tem sido uma alternativa para mitigação desses problemas de acidez (altos teores de Al e/ou baixos teores de Ca) em maiores profundidades (RAUT, et al. 2020). O gesso agrícola é, basicamente, o sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), subproduto que é gerado nas indústrias de fertilizantes fosfatados (BRASIL; LIMA; CRAVO, 2020).

As raízes das plantas cultivadas se concentram principalmente nas camadas superficiais do solo, porém, apresentam potencial para um crescimento para as camadas mais profundas. Com a aplicação de gesso, esse potencial de crescimento é estimulado, fazendo com que as plantas tenham maior capacidade de absorver água e nutrientes, o que é de extrema relevância, principalmente em situações de veranicos (CARDUCCI, et al. 2014; SILVA et al. 2017; CARDUCCI, et al. 2014; SILVA et al. 2014). O gesso, além de atuar na precipitação do Al tóxico encontrado nas camadas subsuperficiais do solo (na forma de sulfato de alumínio, principalmente), é fonte de S e também de Ca, nutrientes importantes para estimular o crescimento radicular. A resposta das lavouras à melhoria química propiciada pela aplicação do gesso é ainda maior quando acompanhada de outras práticas de manejo,

como adubação adequada, tratos fitossanitários, controle de plantas daninhas, entre outras (MACANA et al. 2020).

Michalovicz et al. (2018), avaliando o efeito do gesso aplicado em um Latossolo argiloso, com doses crescentes de até 12 t ha^{-1} , encontraram aumento da quantidade de cálcio e sulfato até a profundidade de 80 cm, em avaliação feita 18 meses após a aplicação dos tratamentos. Nesse estudo, os autores relataram efeitos positivos do gesso na produtividade de milho e cevada quando aplicada doses de até $4,8$ e $6,1 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente. Outros estudos Caires et al. (2011) também reportaram aumentos na produtividade de milho e soja com a aplicação de gesso até a dose de 9 t ha^{-1} .

Apesar de existir diversos trabalhos avaliando os efeitos de doses de gesso nos solos e em plantas, ainda são precisos mais resultados referentes à eficiência e potencial benefício da aplicação de gesso nas características ao longo do perfil de solos tropicais, bem como sua influência no crescimento, nutrição e produtividade das culturas. Além disso, pesquisas, mesmo que em casa de vegetação, usando solos coletados até maiores profundidades, são importantes para avaliar o benefício do gesso no crescimento radicular.

Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi: i) avaliar a disponibilidade de Ca, Mg, K e S em amostras de solos coletadas em diferentes profundidades, até 100 cm, em colunas que foram incubadas com doses de gesso durante 510 dias e que receberam uma quantidade acumulada de água de 1568,40 mm; e ii) avaliar o efeito das doses de gesso no cultivo de feijoeiro (produção de massa seca, grãos, teores nutricionais e distribuição do sistema radicular em profundidade).

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para a montagem do experimento, foram utilizadas amostras de um Latossolo Vermelho distrófico, coletado em local de mata nativa no campus da UFLA em janeiro de 2017 ($21^{\circ}13'44.14''\text{S}$ e $44^{\circ}57'54.65''\text{O}$). A descrição mineralógica do solo, realizada por Silva et al. (2022), indica o predomínio de óxidos de ferro (Hematita, Goethita) na fração argila deste solo. Foram coletadas separadamente amostras nas profundidades de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40, 40 a 60 e 60 a 100 cm e colocadas em sacos plásticos devidamente identificados. Essas amostras foram secas ao ar e peneiradas em malha de 4 mm antes de serem colocadas nas colunas. Subamostras de cada profundidade foram retiradas, peneiradas em 2 mm e submetidas a caracterização química fertilidade física do solo (Teixeira et al., 2017) (Tabela 1).

Tabela 1 – Caracterização química e física de um Latossolo Vermelho distrófico em diferentes profundidades para o empacotamento de colunas de lixiviação.

Atributos de fertilidade	Profundidade (cm)				
	0-10	10-20	20-40	40-60	60-100
pH	5,00 – (5,00) *	4,9 – (5,4)	5,00	5,00	5,20
K (mgdm ⁻³)	62,63 – (172,2) *	36,5 – (165,96)	19,10	8,22	3,86
P (mgdm ⁻³)	1,27 – (13,26) *	0,70 – (15,7)	0,56	0,42	0,39
S (mgdm ⁻³)	15,10	7,40	3,54	4,52	5,56
Ca (cmol _c dm ⁻³)	0,5 – (4,32) *	0,20 – (3,44)	0,15	0,13	0,10
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,27 – (1,62) *	0,16 – (1,31)	0,10	0,10	0,10
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,7 – (0,26) *	0,6 – (0,24)	0,5	0,3	0
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	8,42 – (3,26) *	8,42 – (4,44)	6,74	5,83	4,27
SB (cmol _c dm ⁻³)	0,90 – (6,38) *	0,40 – (5,17)	0,30	0,25	0,21
t (cmol _c dm ⁻³)	1,57- (6,64) *	1,09 – (5,41)	0,79	0,52	0,19
T (cmol _c dm ⁻³)	9,40 – (9,64) *	8,87 – (9,61)	7,04	6,08	4,48
V (%)	10,4 – (66,18) *	5,11 – (53,79)	4,25	4,13	4,69
m (%)	44,5- (3,91) *	55,0 – (4,43)	63,3	57,7	0,00
M.O (dagkg ⁻¹)	3,9	2,70	3,28	2,01	1,38
P-rem (mgL ⁻¹)	10,21	8,79	6,90	7,47	6,20
Argila (dagkg ⁻¹)	65,00	67,00	65,00	70,00	67,00
Silte (dagkg ⁻¹)	13,00	13,00	14,00	12,00	14,00
Areia (dagkg ⁻¹)	22,00	20,00	21,00	18,00	19,00

* Valores entre parênteses referem-se às análises realizadas após a correção das camadas iniciais terem sido corrigidas com óxidos de Ca e Mg. pH em água - Relação 1:2,5. Ca - Mg- Al- Extrator: KCl - 1 molL⁻¹. P- K- Extrator: Mehlich 1. H + Al - Extrator: SMP. S - Extrator - Fosfato monocálcio em ácido acético. Mat. Org. (MO) - Oxidação com Na₂Cr₂O₇ 4N+ H₂SO₄ 10N. SB: Soma de Bases Trocáveis. CTC (t): Capacidade de Troca Catiônica Efetiva. CTC (T): Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0. V: Índice de Saturação de Bases. m: Índice de Saturação de Alumínio. Classe Textural: Muito Argilosa. Valores entre parênteses se referem aos teores após a correção da acidez, fosfatagem potássagem.

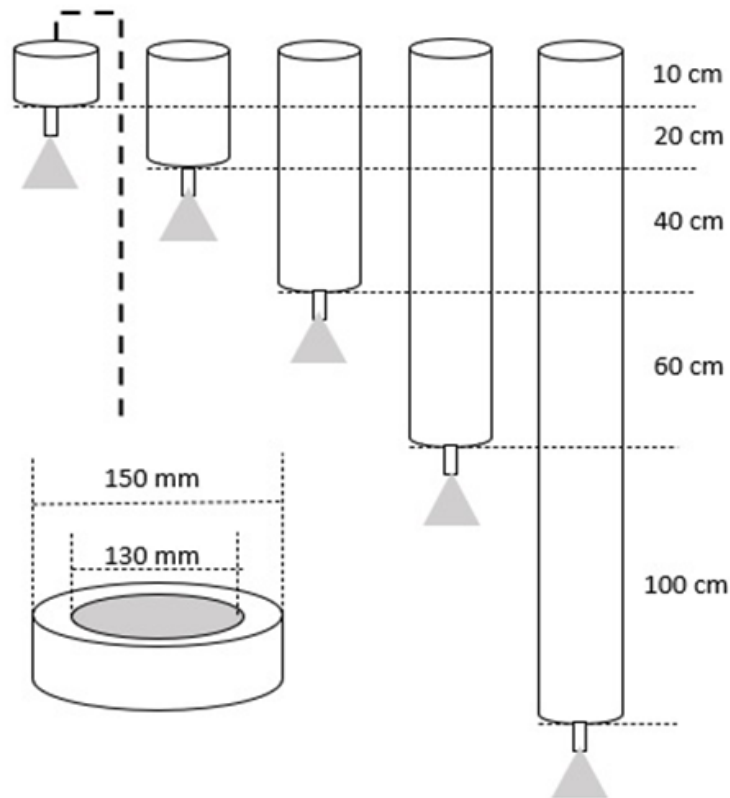
Fonte: Do autor (2021).

Foi feita a correção das camadas iniciais do solo (0 a 10 e 10 a 20 cm), com óxidos de cálcio e de magnésio e também uma potassagem corretiva com fosfato de potássio. Essas práticas corretivas visaram elevar o teor de Ca²⁺ para 45% da CTC a pH 7 (T), o Mg²⁺ para 15% e o K⁺ para 5 % da CTC. Esses são níveis considerados ideais para solos cultivados (SOUZA; LOBATO, 2005). As amostras das camadas foram incubadas por aproximadamente 45 dias com água destilada suficiente para que o teor de umidade fosse próximo da capacidade de campo. Os sacos plásticos contendo as amostras foram agitados a fim de

aumentar a velocidade da reação. Após o período de incubação, foram retiradas subamostras para análises químicas e físicas (valores entre parênteses na tabela 1).

O experimento foi instalado dentro da casa de vegetação utilizando-se colunas feitas com tubo de PVC de 150 mm de diâmetro (área de 0,0176 m²) cortadas e montadas de acordo com as profundidades estudadas. O esquema das colunas esquema é apresentado na figura 1. Na base de cada conjunto foi deixada uma saída para escoamento do efluente. Foi o empacotamento do solo nas respectivas profundidades, as amostras foram colocadas cuidadosamente, sem causar compactação. Após esse empacotamento, foi adicionada água até próximo à capacidade de campo e foi deixada incubada por aproximadamente 12 meses, com o objetivo de acomodar o solo antes da aplicação das doses de gesso, sendo submetido a uma sequência de molhamento e secagem, para que esse pudesse assumir a forma o mais próximo da realidade em campo.

Figura 1 – Esquema de aplicação de gesso em coluna.



Legenda: Representação esquemática das colunas de lixiviação; em detalhe a área superficial da coluna (150 mm de diâmetro) e a parte central mais escura (130 mm de diâmetro) que foi delimitada com um anel plástico de menor diâmetro onde o gesso foi aplicado, inserido cerca de 2 cm no solo para evitar escoamento nas laterais da coluna, onde foi aplicado o gesso e a água.

Fonte: Do autor (2021).

A aplicação dos tratamentos com dose de gesso foi realizada em fevereiro de 2018. Foram aplicadas seis doses crescentes de gesso agrícola equivalentes a 0 (controle), 1,5, 3, 7, 11 e 15 t ha⁻¹, (tratamentos: G0, G1,5, G3, G7, G11 e G15), sendo a equivalência de acordo com a área superficial da coluna, o que resultou nas quantidades aplicadas de 0, 2,64, 5,28, 12,32, 19,36, 26,40 g de gesso por coluna, respectivamente. O gesso foi aplicado dentro de anéis plásticos com 130 mm de diâmetro (Figura 1), colocados no centro da área superficial de cada coluna. O experimento foi conduzido como delineamento inteiramente casualizado com seis doses e cinco profundidades e três repetições, totalizando 90 colunas.

Após a aplicação do gesso na superfície de cada coluna, foi adicionada água deionizada dentro do anel centralizado, para promover o molhamento e coletado o material lixiviado por aproximadamente 15 meses, totalizando 1568,40 mm de lâmina de água aplicada ao longo de 510 dias.

Ao final do período de lixiviação, que visou avaliar a movimentação de íons em função das doses de gesso e quantidade de água aplicada (tratada no artigo 1), foram retiradas amostras de solo por meio de furos laterais nas colunas em diferentes profundidades. Assim, foram coletadas camadas de 2 cm nas profundidades de 8 a 10, 18 a 20, 38 a 40, 58 a 60 e 98 a 100 cm. Nessas amostras, foram realizadas análises de pH, e dos elementos Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺, K⁺ e S, seguindo a metodologia descrita em Teixeira et al. (2017).

Na sequência, foi feita uma adubação de plantio, seguindo as recomendações de Malavolta (1992), excluindo o cálcio, magnésio, potássio e enxofre, visto que esses já tinham sido aportados via a correção das camadas superficiais das colunas (até 20 cm) e foram cultivadas plantas de feijão nas colunas. A adubação foi calculada para os 20 cm superficiais das colunas, tendo sido aplicada as seguintes quantidades: 200 mg dm⁻³ de fósforo, 200 mg dm⁻³ de nitrogênio (metade antes do plantio e metade em cobertura), 0,5 mg dm⁻³ de boro, 1,5 mg dm⁻³ de cobre, 0,1 mg dm⁻³ de molibdênio e 5 mg dm⁻³ de zinco, nas formas de ácido fosfórico, nitrato de amônio, ácido bórico, nitrato de cobre, molibdato de amônio e nitrato de zinco respectivamente.

Foi semeada a variedade de feijão BRS FC-104, considerada super precoce, com ciclo aproximado de 65 dias. Por ter um crescimento muito rápido, a exploração do solo pelas raízes não é muito agressiva, tornando-a mais susceptível a veranicos, sendo necessário promover melhores condições para o desenvolvimento das raízes. Foram semeadas 5 sementes por vaso (coluna), e realizados desbaste após germinação, deixando apenas uma planta por coluna. As colunas foram irrigadas com água deionizada e fechadas na parte de

baixo a fim de evitar o escoamento de água. Aos 50 dias após o plantio, iniciou-se a coleta das folhas que começaram a cair e foram armazenadas em sacos de papel devidamente identificados para cada coluna/tratamento. Aos 62 dias após a semeadura, o enchimento das vagens do feijão estava completo e a aplicação de água foi interrompida. Assim que as plantas se apresentaram completamente secas, foi realizada a colheita, separando-se a parte aérea dos grãos para posteriores análises. Visando avaliar o crescimento radicular do feijoeiro, as raízes foram coletadas separadamente em cada camada da coluna: 0 a 20, 20 a 40, 40 a 60, 60 a 80 e 80 a 100 cm. As raízes foram lavadas em bandejas com água deionizada e secas para pesagem.

O material vegetal coletado (parte aérea, grãos e raízes) foi, assim que coletados/lavados, colocados em estufa para serem secados a 70 graus até atingir peso constante. A parte aérea e os grãos secos foram triturados em um moinho de facas tipo Whaley, para posterior digestão ácida e caracterização química. Foi realizada a digestão nítrico-perclórica, seguindo metodologia recomendada por Malavolta et al. (1992), sendo os extratos analisados por espectrometria de emissão atômica de plasma acoplado individualmente ICP-OES.

Os dados obtidos foram trabalhados por meio de estatística descritiva. Nesse contexto, para cada atributo (variável resposta) e tratamento, foram calculados a média e o erro padrão da média, os quais foram apresentados nos gráficos, afim de demonstrar a variabilidade dos dados obtidos, o que permite inferir sobre a diferença entre os tratamentos avaliados. Além disso, a influência das doses de gesso sobre as variáveis respostas do estudo com o feijoeiro foi avaliada por meio de equações de regressão, as quais foram determinadas (incluindo o nível de significância) usando o assistente de análise de regressão do SigmaPlot®. As figuras também foram geradas a partir do software Sigma Plot®.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 pH e teores de íons disponíveis

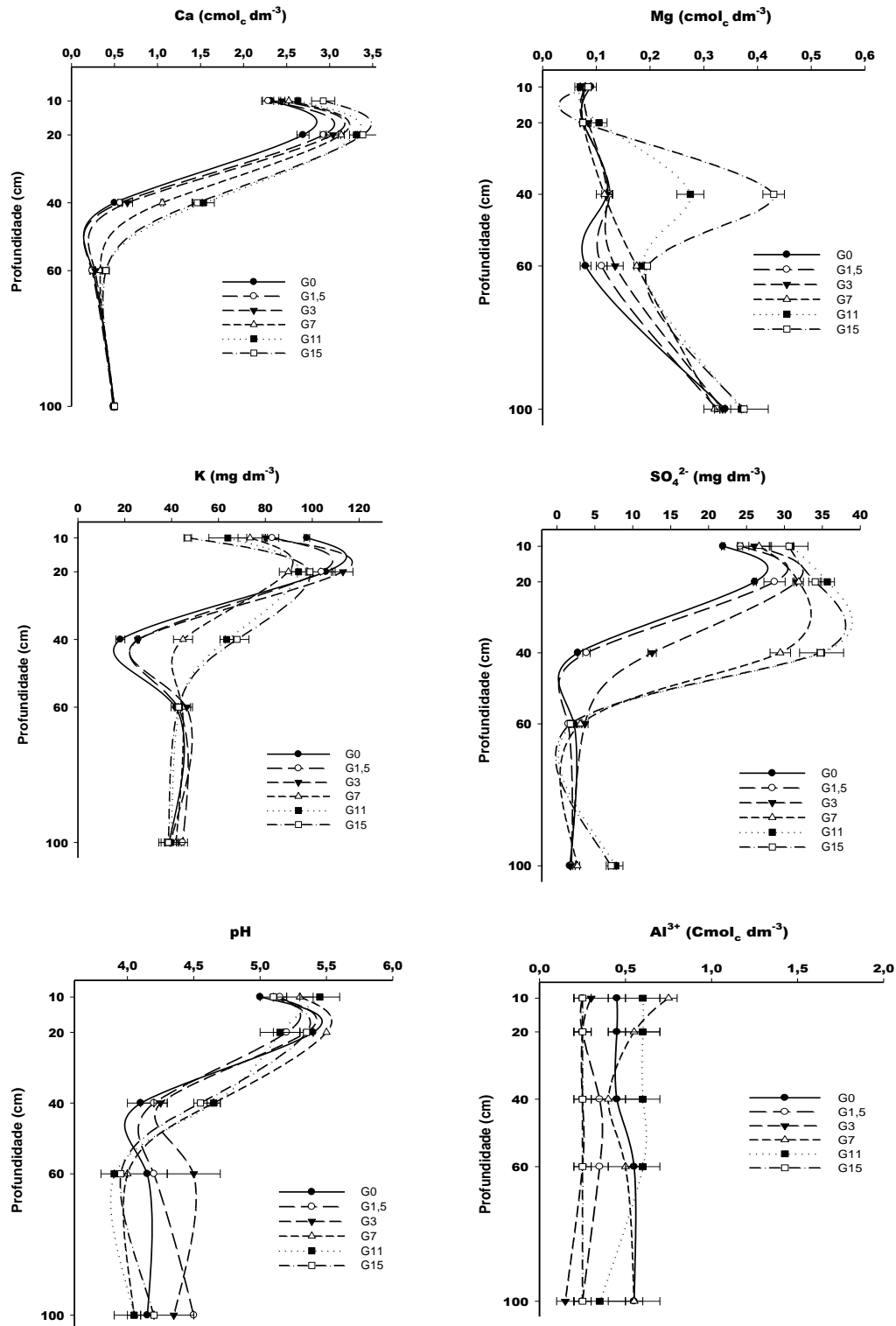
Os resultados de pH em água, bem como dos teores disponíveis dos elementos Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , SO_4^{2-} e Al^{3+} , determinados nas amostras coletadas após o período de incubação e lixiviações, encontram-se na figura 2. Nota-se que o teor de Ca (Figura 2) no solo aumentou ao longo do perfil do solo nas profundidades de 10, 20 e 40 cm, tendo sido encontrados maiores teores para as maiores doses de gesso aplicadas. Os maiores teores de Ca foram

detectados a 20 cm de profundidade, visto que essa camada recebeu Ca tanto do gesso quanto do óxido de Ca usado na correção da acidez superficial das colunas. Na profundidade de 10 cm, os teores foram 2,32, 2,29, 2,45, 2,53, 2,63 e 2,93 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, nos tratamentos G0, G1,5, G3, G7, G11 e G15, respectivamente. O maior valor de Ca, em 20 cm, foi no tratamento G15 com 3,39 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, e o menor valor para o G0 com 2,69 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, resultados esperados devido ao maior aporte de Ca fornecido pelo gesso.

Os teores de magnésio no solo (Figura 2) nas profundidades iniciais não foram diferenças entre os tratamentos nas profundidades de 10 e 20 cm. Na profundidade de 40 cm, os tratamentos G11 e G15, com 0,48 e 0,53 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente, foram maiores do que os demais tratamentos, sendo o G0 (controle) com 0,12 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$. Na profundidade de 100 cm, os teores não se diferenciaram entre os tratamentos estando entre 0,33 e 0,38 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, indicando o carreamento, pois, na análise inicial antes da aplicação do gesso, o teor de Mg nessa profundidade era de 0,1 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$.

Os teores de K no solo (figura 2c) diminuíram com o aumento das doses de gesso aplicada, sendo, na camada de 10 cm, de 97, 71, 82,92, 80,16, 73,46, 63,97 e 46,89 mg dm^3 para os tratamentos G0, G1,5, G3, G7, G11 e G15, respectivamente. Na camada de 20 cm, os teores de K não foram significativamente diferentes. Na profundidade seguinte (40 cm), os teores de K no solo foram de 18,12, 25,71, 25,63, 44,87, 63,50 e 67,91 mg dm^3 nos tratamentos G0, G1,5, G3, G7, G11 e G15, respectivamente, o que indica o aumento da lixiviação do K de acordo com a dose de gesso aplicada. A partir da camada de 60 cm de profundidade, os teores de K não se diferiram em função dos tratamentos.

Figura 2 – Resultados de pH em água, bem como dos teores disponíveis dos elementos Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , SO_4^{2-} e Al^{3+}



Legenda: pH em água e teores disponíveis de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , SO_4^{2-} e Al^{3+} no solo nas diferentes profundidades. (*) Barras horizontais referem-se ao erro padrão da média.

Fonte: Do autor (2021).

Os teores de sulfato no solo (Figura2), na profundidade de 10 cm, foram maiores para os tratamentos G11 e G15, sendo de 30,85 e 30,69 mg dm⁻³, respectivamente. Esses maiores valores foram também observados nesses tratamentos para a camada de 20 cm, onde os teores foram 35,65 e 34,05 mg dm⁻³. Em 40 cm de profundidade, os maiores teores de S foram encontrados para os tratamentos G7, G11 e G15, mostrando o efeito da dose de gesso na descida de enxofre para camadas mais profundas no perfil do solo. Na profundidade de 60 cm os teores no solo de sulfato não apresentaram diferença em relação aos tratamentos. Os teores de sulfato foram superiores, aos 510 dias e após aplicação de 1568,40 mm de água acumulada, na profundidade de 100 cm, nos tratamentos G11 e G15.

Os valores de pH do solo (Figura 2) não apresentaram diferenças entre os tratamentos aplicados em todas as profundidades, sendo os maiores valores nas camadas iniciais de 10 e 20 cm, camadas essas que receberam a correção com os óxidos de Ca e Mg (Ribeiro et al. 1999). A partir desta camada, os valores de pH no solo diminuíram aproximadamente uma unidade em relação as profundidades corrigidas. Os teores de alumínio no solo (Figura 2) não apresentaram diferenças entre os tratamentos aplicados e também não se alteraram ao longo do perfil do solo.

O gesso agrícola é basicamente o par iônico CaSO₄.2H₂O (VAN RAIJ, 2008), um par iônico que é relativamente móvel no solo. Após sua dissolução no solo e dissociação, pode haver a precipitação, o que faz com que Ca e SO₄²⁻ aumentem no solo em maiores profundidades. O aumento de cálcio e sulfato no solo em maiores profundidades, após a aplicação de gesso, é muito relatado na literatura por exemplo, (FERRAZ, 2017, RAMOS et al. 2013, CAIRES et al. 2016, NORA et al. 2017, TIECHER et al. 2018), assim como também são apresentados efeito do tempo e da quantidade água no solo para a descida do par iônico.

Ramos et al. (2013) encontraram resultados semelhantes aos relatados no presente estudo. Avaliando diferentes camadas de um Latossolo Vermelho muito argiloso em campo, 16 meses após a aplicação de crescentes doses de gesso, os autores relataram aumentos nos teores de Ca e SO₄²⁻ em camadas mais profundas do solo, aumentando o teor no solo conforme a dose aplicada na superfície. Aqui, o cálcio desceu até a profundidade de 60 cm nas colunas, onde foi possível observar uma pequena diferença nos tratamentos G0 e G15, com valores de 0,25 a 0,40 cmol_c dm⁻³. Tal resultado corrobora com resultados encontrados por Caires et al. (2011), onde, em sistema de plantio direto, em avaliação realizada 36 meses após a aplicação de 9 t ha⁻¹ de gesso, encontraram aumentos de Ca²⁺ e SO₄²⁻ no solo até a profundidade de 60 cm. Ferraz et al. (2017) avaliando um Latossolo cultivado com café

tratado com até 56 t ha⁻¹ de gesso encontrou aumento no teor de Ca no solo até a profundidade de 2,35 m e aumento no teor de SO₄²⁻ até 130 cm, em avaliação feita 76 meses após a aplicação das doses de gesso.

Na maior profundidade (100 cm), os tratamentos não se diferiram entre si quanto ao Ca, indicando que o efeito do gesso nesse período de aplicação de água foi até os 60 cm. Estudos avaliando o tempo de aplicação, como os de Ramos et al. (2013), Nora et al. (2017) e Tiecher et al. (2018) demonstraram o efeito maior na descida do Ca no perfil do solo com aumento do tempo e do volume acumulado de água.

A presença de uma maior concentração de Ca no solo causa competição com o Mg e K pelos sítios dos minerais (RAMOS et al. 2019), fazendo com que ocorra a lixiviação do mesmo para camadas inferiores até as menos exploradas pelas raízes do solo, o que pode até causar sintomas de deficiência nas plantas (ZOCA; PENN, 2017). Os Latossolos Brasileiros possuem em sua maioria cargas dependentes de pH, geralmente com um ponto de carga zero (PCZ) alto (WEBER et al. 2005), o que faz com que nas camadas mais profundas, onde o pH é menor, ocorre o predomínio de cargas positivas, propiciando assim a lixiviação do Mg para profundidade de 100 cm.

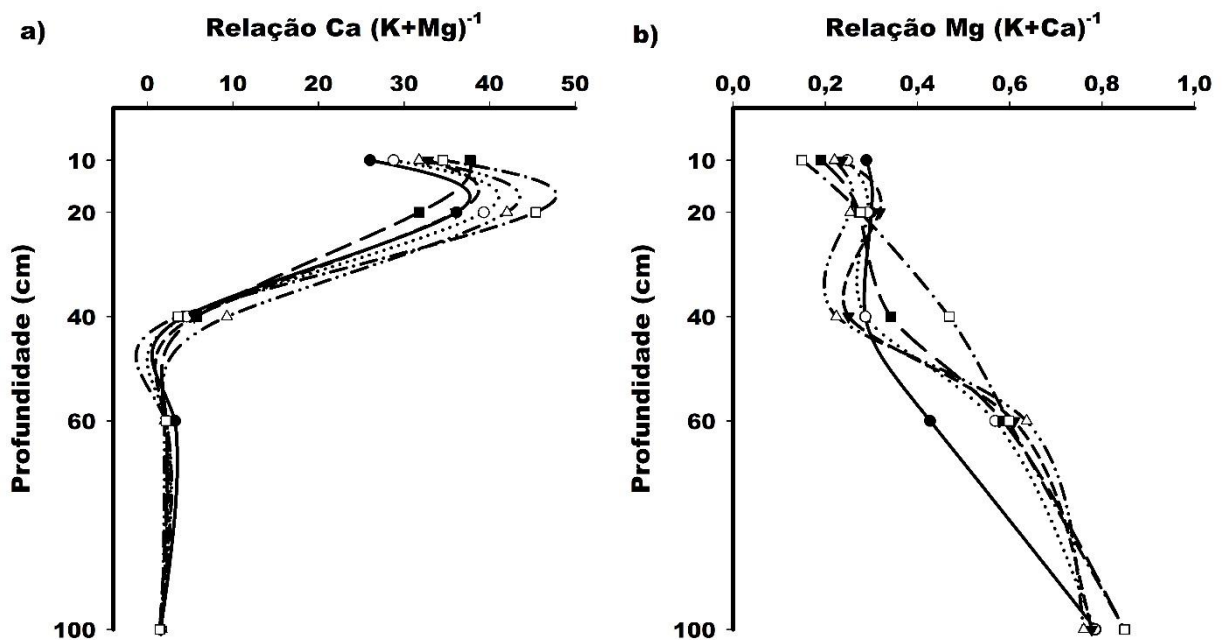
Michalovicz et al. (2018), avaliando o efeito do gesso agrícola em um Latossolo com doses de até 12 t ha⁻¹, relataram que de uma safra para outra o teor de Mg diminuiu até a profundidade de 80 cm, enquanto o K no solo diminuiu com o aumento da dose até a camada de 20 cm, porém, aumentou em profundidade de até 60 cm. Rampim et al. (2011), trabalhando com dose de até 5 t ha⁻¹ de gesso, em solo argiloso relataram que o teor de K no solo diminuiu com o aumento das doses até 10 cm de profundidade em um ano de cultivo. Ramos et al. (2013) na avaliação de um Latossolo muito argiloso 16 meses após a aplicação de crescentes doses de gesso (até 56 t ha⁻¹) perceberam a diminuição do K ao longo do perfil do solo até 240 cm, porém, sem influência da dose aplicada.

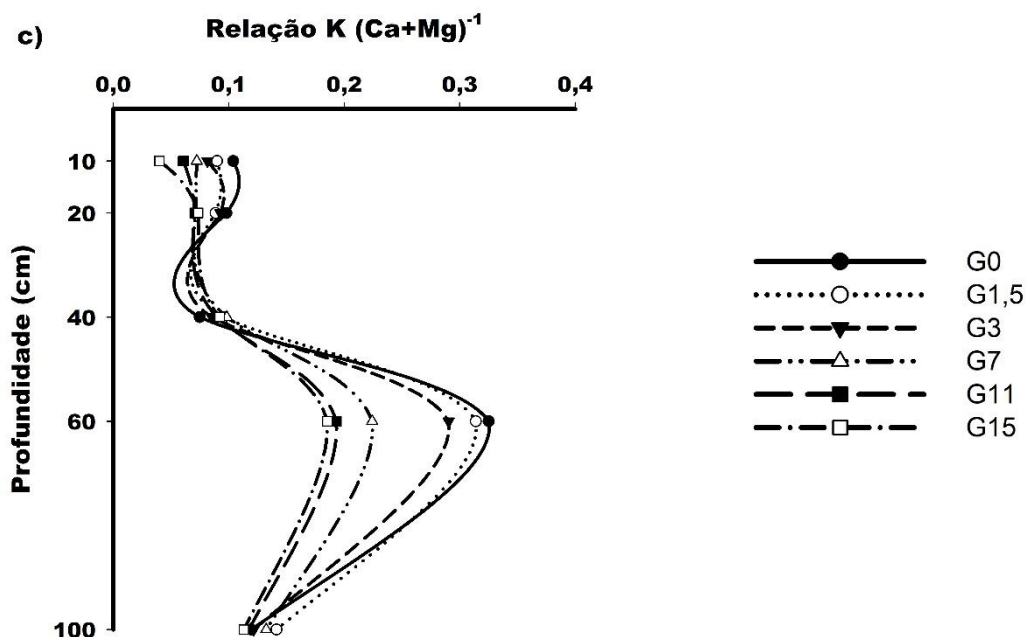
A ausência de efeitos do gesso no pH do solo em camadas superficiais já foi observada em Latossolos Brasileiros (CAIRES et al. 2004; CARVALHO; NASCENTE, 2018, FERRAZ, 2017). Porém, um pequeno efeito do gesso no pH do solo nas camadas mais profundas pode indicar a existência de mecanismos indiretos de uma reação que pode aumentar o pH do solo em pequenas quantidades, reações demonstradas por Summer et al. (1986) e Van Raij (2008). Essa reação ocorre quando os óxidos de Fe e Al (muito presentes em Latossolos brasileiros) que estão ligadas a hidroxila reagem com o sulfato as liberando na

solução, esse pequeno aumento de pH é chamado de autolimitação (TOMA, et al. 1999), ocorrendo geralmente quando a concentração de sulfato é muito alta.

As relações das bases no solo estão apresentadas na figura 3. Maiores relações de $\text{Ca}/(\text{Mg}+\text{K})$ ocorreram na profundidade de 20 cm, sendo os valores maiores quando as maiores doses de gesso foram aplicadas. A relação do $\text{Mg}/(\text{Ca}+\text{K})$ (figura 3b), mostrou que não houve diferença entre os tratamentos nas profundidades de 10 e 20 cm. Em 40 cm de profundidade, o tratamento G15 apresentou maior valor dessa relação ($\text{Mg}/(\text{Ca}+\text{K})$) comparado com os demais, tendo relação com o deslocamento do Mg causado por maior aporte de Ca vindo do gesso. Na profundidade de 60 cm, o tratamento controle (GO) apresentou menor relação comparado com os demais, que não se diferenciaram. Os maiores valores da relação $\text{Mg}/(\text{Ca}+\text{K})$ foram encontrados na profundidade de 100 cm, não se diferenciando entre os tratamentos, inclusive o controle. Esse resultado corrobora com os dados apresentados na figura 3, onde foi possível observar que o teor de Mg no solo aumentou nesta profundidade em todos os tratamentos.

Figura 3 – Relações das bases Ca, Mg e K no solo ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$).





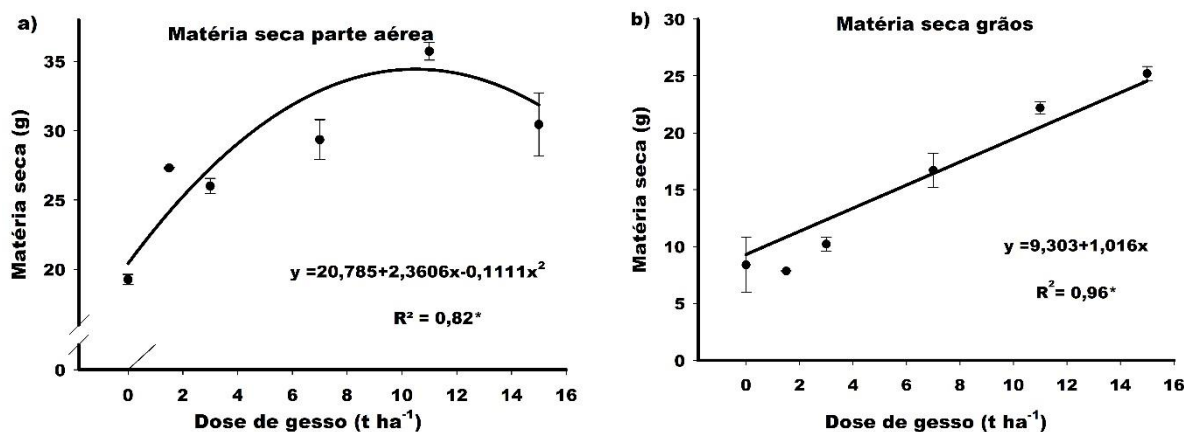
Legenda: Relações das bases Ca, Mg e K no solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$).
 Fonte: Do autor (2021).

Os valores da relação do $K/Ca+Mg$ (Figura 3c) indicaram que não houve diferença entre os tratamentos até a profundidade de 40 cm. Na profundidade de 60 cm, à medida que se aumentou a dose de gesso aplicada, os valores dessa relação diminuíram, o que ocorreu devido principalmente ao aumento no solo do teor de Mg nesta profundidade (Figura 4).

3.2 Produção de matéria seca da parte aérea e grãos

Os resultados e as equações de ajuste das curvas de respostas para a produção de matéria seca da parte aérea e produção de grãos do feijoeiro estão apresentados na figura 4. A resposta da produção de parte aérea em função das doses de gesso seguiu uma equação polinomial de segundo grau (quadrática) (Figura 4a), sendo a maior produção de matéria seca (ponto máximo da curva) obtida com a aplicação de $10,48 \text{ t ha}^{-1}$. Após essa dose, a produção de parte aérea do feijoeiro reduziu e isso pode estar associado ao aumento da relação Ca com as outras bases no solo causado pela aplicação de altas doses de gesso (Figura 3). A produção de matéria seca de grãos de feijão apresentou crescimento linear em função das doses de gesso aplicadas, até a dose de 15 t ha^{-1} (Figura 4b).

Figura 4 – Curvas de produção de parte aérea e de grãos nas plantas de feijoeiro.



Legenda: Curvas de produção de parte aérea e de grãos nas plantas de feijoeiro.

(*) Barras verticais referem-se ao erro padrão da média. Significativa a $P \leq 0,05$

Fonte: Do autor (2021).

O aumento de Ca proporciona elevação da relação Ca/Mg no solo, como ocorreu de acordo com a figura 3 na profundidade de 20 cm, o que pode causar redução na absorção de Mg, apresentando efeito negativo no crescimento da planta. Estudos relataram que, elevando o teor de Ca do solo com 21 t ha⁻¹ de calcário na forma de óxidos, houve um menor crescimento e produção de matéria seca de parte aérea em plantas de milho (Medeiros et al., 2008). Zandoná et al. (2015) encontraram um aumento de produtividade de 11,4 % na produção de soja ao se aplicar 2 t ha⁻¹ de gesso. Caires et al. (2005) encontraram resultados semelhantes com crescimento linear na produção de milho e soja com aplicação de até 9 t ha⁻¹.

Michalovcz et al. (2014), também relataram aumento linear na produção de milho até a dose de 6 t ha⁻¹. Em cevada, em avaliação por três cultivos, houve comportamento quadrático, com a produtividade aumentando até a dose de 4,9 t ha⁻¹ e diminuindo nas maiores doses. Estudos, como os de Caires et al. (2011) e Kost et al. (2014), relataram um comportamento quadrático, também notando uma diminuição da produção de milho em doses acima de 7,8 e 9,5 t ha⁻¹ de gesso aplicadas. Por outro lado, em trabalho de Michalovcz et al. (2019), não houve resposta da dose de gesso aplicada, de até 12 t ha⁻¹, na produtividade de feijão. Essa falta de resposta da cultura foi relatada por outros autores (GALON et al. 1996; CARVALHO; NASCENTE, 2018). Contudo, vale ressaltar que vários fatores devem ser levados em consideração quando se avalia o potencial de resposta positiva de uma determinada cultura a aplicação de gesso. Um aspecto relevante a ser avaliado é se o solo apresenta elevados teores de Al e/ou baixos teores de Ca em profundidade, fatores esses que

prejudicam o crescimento radicular e posterior absorção de nutrientes e água. Além disso, a falta de resposta em alguns casos pode ser devido a não ocorrência de veranicos ou situações de baixa disponibilidade de água no solo. Caso não ocorrer deficiência hídrica, a produtividade da cultura, principalmente culturas anuais, pode não ser alterada em função do gesso, caso as camadas superficiais estiverem bem corrigidas com calcário e bem fertilizadas.

Há estudos na literatura que mostram que doses de gesso acima das recomendadas tradicionalmente trazem benefícios para as culturas, como uma maior produtividade no caso do feijão. Para o solo usado no presente estudo, o qual apresenta um teor de argila de 65%, a dose que seria recomendada de gesso, considerando uma camada de 20 a 40 cm, seria de 3,25 t ha⁻¹, sendo cerca de 3,2 a 4,6 vezes inferior a dose que propiciou a maiores produções de matéria seca, ou seja, o emprego de gesso deve levar em conta a relação custo/benefício para a cultura em questão, podendo, muitas vezes, ser superior àquelas que vêm sendo recomendadas tomando-se como base os teores de argila, alumínio e cálcio.

3.3 Análise nutricional da parte aérea do feijoeiro

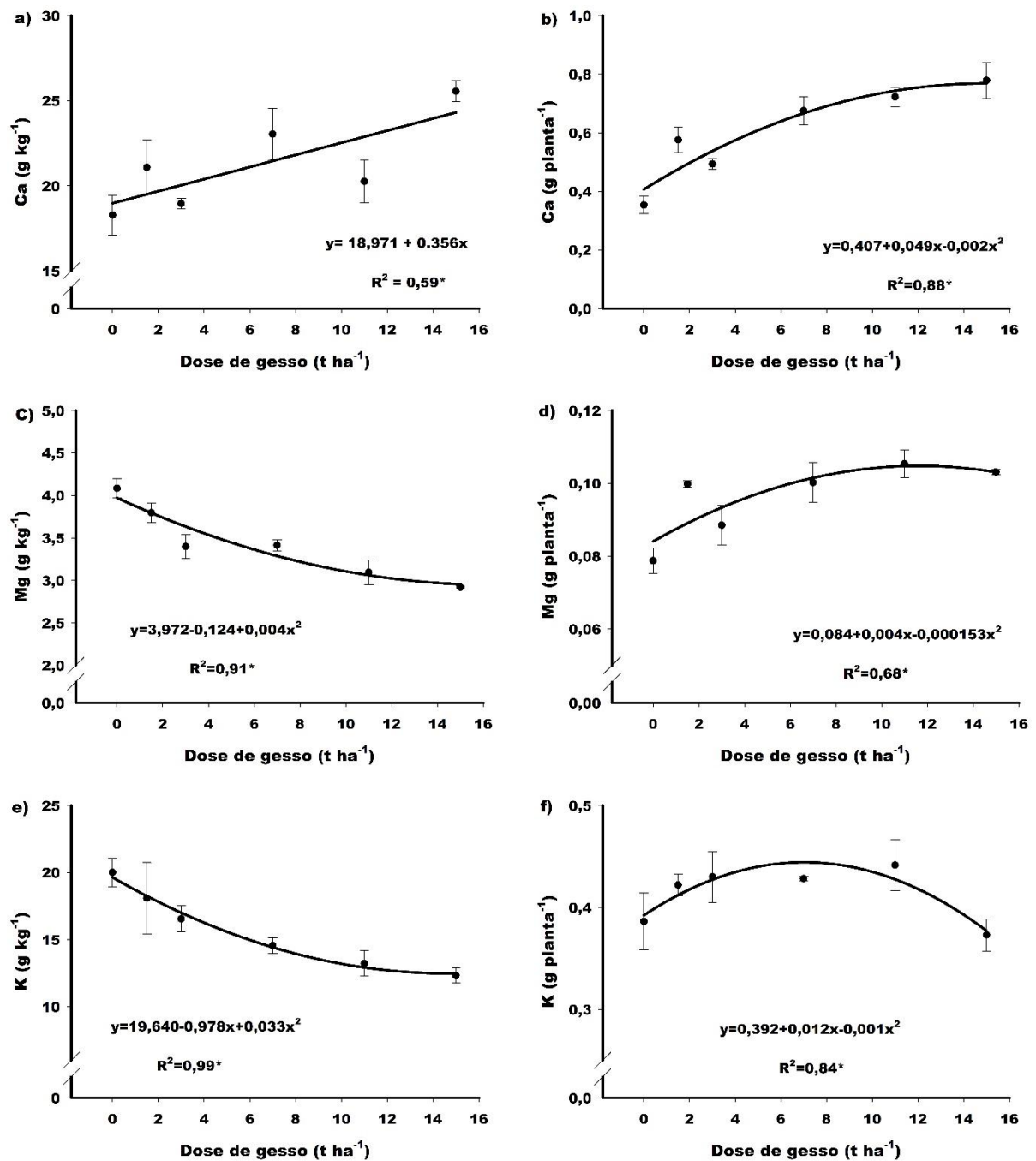
Os resultados e as equações da análise nutricional da parte aérea do feijoeiro, contendo os resultados de teores acumulados por planta para Ca, Mg, K e S, estão apresentados na Figura 5. O aumento do teor de Ca na parte aérea das plantas de feijão ocorreu de forma linear (Figura 5a) em resposta às doses de gesso, variando de 18,28 a 25,55 g kg⁻¹ nos tratamentos G0 e G15 respectivamente. A quantidade de Ca acumulada na parte aérea por planta (Figura 5b) se ajustou a uma curva polinomial (quadrática), onde o maior valor encontrado foi na dose de 14,82 t ha⁻¹, com a quantidade de Ca acumulada por planta diminuindo após essa dose de gesso.

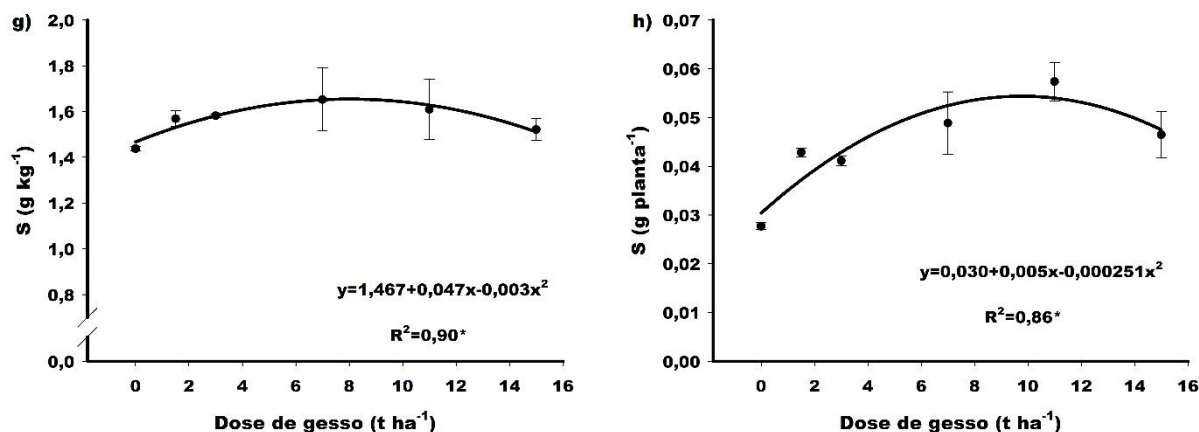
O teor de Mg na parte aérea (Figura 5c) reduziu na medida em que se aumentaram as doses de gesso, até se tornar constante. A quantidade de Mg acumulada na parte aérea, por planta, se ajustou em uma curva polinomial (quadrática) onde o a maior quantidade de Mg acumulada por planta foi na dose de 11,13 t ha⁻¹ de gesso, acompanhando a curva de resposta da produção de parte aérea da planta (Figura 4).

O teor de K na parte aérea (Figura 5e) se comportou de forma similar ao descrito para o teor de Mg, ou seja, reduziu com as doses de gesso, de forma quadrática. A quantidade acumulada por planta de K (Figura 5f) se ajustou de forma quadrática onde a maior quantidade encontrada foi na dose de 7,44 t ha⁻¹ de gesso agrícola, comportamento semelhante ao encontrado para produção de parte aérea (figura 4a).

O teor de S na parte aérea (Figura 5g) em função das doses de gesso se ajustou em uma curva polinomial quadrática, onde o teor na folha aumentou até a dose de 7,9 t ha⁻¹ de gesso, diminuindo a partir dessa dose. A quantidade acumulada de S em por planta (Figura 5h) também apresentou comportamento quadrático, com o maior acúmulo sendo encontrado quando 9,49 t ha⁻¹ de gesso foram aplicadas.

Figura 5 – Teores (g kg⁻¹) e acúmulos (g planta⁻¹) de Ca, Mg, K e S na parte aérea do feijoeiro.





Legenda: Teores (g kg^{-1}) e acúmulos (g planta^{-1}) de Ca, Mg, K e S na parte aérea do feijoeiro.

(*) Barras verticais referem-se ao erro padrão da média. Significativo ao nível de $P \leq 0,05$.

Fonte: Do autor (2021).

A absorção de Ca pelas plantas é limitada a pequenas zonas meristemáticas das raízes, onde estão presentes as paredes celulares secundárias (MICHALOVICZ et al. 2018). Assim, com maior quantidade e conseqüentemente uma maior distribuição do Ca no solo, sua absorção é influenciada positivamente para maior acúmulo. Resultados semelhantes foram encontrados por Michalovciz et al. (2014), onde com tratamentos com doses de gesso de até 6 t ha^{-1} relataram aumento linear do teor de Ca na parte aérea de milho e cevada. Caires et al. (2002), avaliando um Latossolo sob plantio direto e aplicação linear de gesso até 9 t ha^{-1} , também encontraram comportamento linear do teor de Ca nas folhas de trigo.

Os resultados encontrados corroboram com o estudo de Michalovciz et al. (2018), em um Latossolo com sistema de plantio direto utilizando de 0 a 12 t ha^{-1} de gesso. Com a implantação de culturas de milho e cevada intercaladas, em ambos os cultivos, o teor foliar de Ca na parte aérea aumentou de forma linear de acordo com aumento da dose de gesso.

O acúmulo de Mg por planta aumentou até a dose de $11,13 \text{ t ha}^{-1}$, aumentando de acordo com a produção de parte aérea (figura 4). Influenciado também pelo aumento da disponibilidade de Mg causado pelo aumento de Ca fornecido pelo gesso comportamento semelhante também foi encontrado para o K acumulado por planta (ZOCA; PENN, 2017). A diminuição no teor de Mg e K na parte aérea se deve a competição pelos mesmos sítios de absorção da planta (TOMMA et al. 1999). Os níveis altos de Ca no solo diminuíram o teor de Mg e K nos tecidos foliares das plantas (FAVARETTO et al. 2008). Estudos de Havlin et al. (2014) reportaram resultados que corroboram com estes, em plantios realizados com culturas de inverno. Em certos casos, os sintomas visíveis de deficiências de Mg e K em plantas submetidas a altas doses de gesso também foram relatadas por Zoca e Penn, (2017).

Experimentos de Syed-Omar e Summer (1991) relataram a diminuição do teor de Mg na parte aérea de alfafa com doses acima de 5 t ha^{-1} de gesso aplicadas ao solo. Michalovicz et al. (2014) notaram diminuição do teor foliar de Mg nas plantas de cevada a partir da dose de $3,0 \text{ t ha}^{-1}$ em Latossolo sob plantio direto. Em contrapartida, Caires et al. (2003), em um sistema de plantio direto na cultura do trigo não encontraram diferenças significativa nos teores foliares de K até a maior dose avaliada de 9 t ha^{-1} .

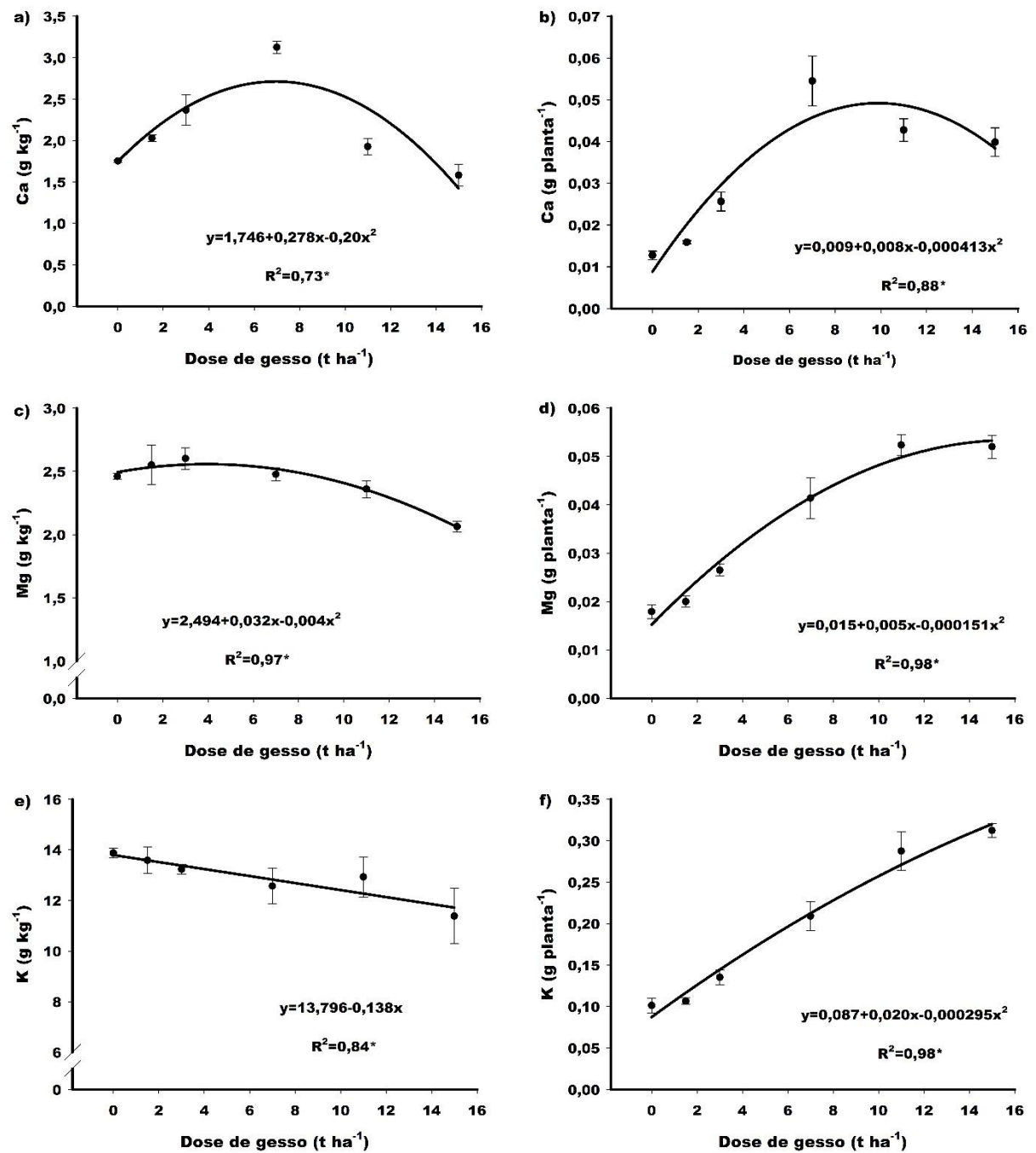
O aumento do teor de S nas folhas das plantas cultivadas em solos que receberam aplicação de gesso deve se ao aumento da disponibilidade de enxofre ao longo do perfil do solo (figura 2), o mesmo tendo sido observado por Tiecher, et al (2018). Diversos trabalhos relataram esse aumento do teor de S na parte aera de plantas. Dentre eles, Michalovicz (2018); Caires et al. (2003).

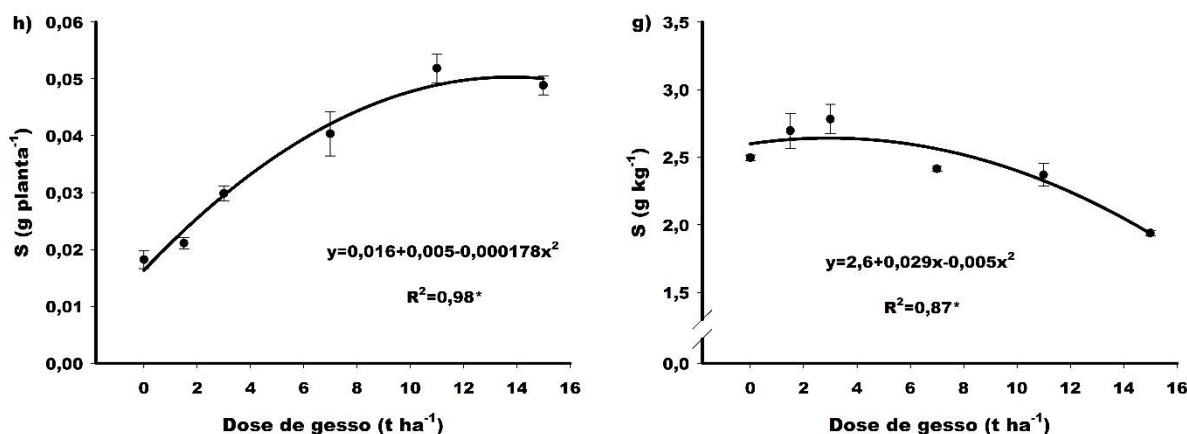
3.4 Análise nutricional dos grãos do feijoeiro

Os teores e acúmulos por planta para Ca, Mg, K e S determinados nos grãos do feijoeiro estão apresentados na figura 6. Os teores de Ca nos grãos do feijoeiro (Figura 6a) se ajustaram em uma curva polinomial quadrática, sendo o maior teor verificado na dose de $6,9 \text{ t ha}^{-1}$ de gesso. A quantidade de Ca acumulada nos grãos, por cada planta (figura 6b), também apresentou um ajuste quadrático com o maior valor acumulado de Ca nos grãos de feijão ocorrendo na dose de $9,55 \text{ t ha}^{-1}$ de gesso.

Os teores de magnésio nos grãos (Figura 6c) reduziram de forma quadrática na medida que se aumentaram as doses de gesso testadas. O maior teor de Mg encontrado foi com a dose de $3,86 \text{ t ha}^{-1}$. O teor acumulado nos grãos por planta (Figura 6d) também se ajustaram de forma quadrática onde as maiores quantidades acumuladas foram na dose $14,88 \text{ t ha}^{-1}$. Os teores e acúmulos de K nos grãos (figura 6e) se comportaram de forma similar aos descritos para Mg. Assim, o teor de K reduziu de forma linear, enquanto o acúmulo de K aumentou de forma quadrática à medida que se aumentaram as doses de gesso aplicadas. Os teores de S nos grãos (figura 6g) se ajustaram de forma quadrática em função das doses de gesso. O maior teor de S foi detectado quando se aplicou a dose de $2,87 \text{ t ha}^{-1}$ de gesso, reduzindo nas maiores doses. Os resultados para a quantidade de S acumulada nos grãos por planta (figura 6h) também se ajustou de forma quadrática, aumentando até atingir o maior valor acumulado na dose de $13,86 \text{ t ha}^{-1}$ de gesso, tendendo estabilizar/reduzir após a essa dose.

Figura 6 – Teores (g kg^{-1}) e acúmulos (g planta^{-1}) de Ca, Mg, K e S nos grãos do feijoeiro.





Legenda: Teores (g kg⁻¹) e acúmulos (g planta⁻¹) de Ca, Mg, K e S nos grãos do feijoeiro.
 (*) Barras horizontais referem-se ao erro padrão da média. Significativo ao nível de $P \leq 0,05$.
 Fonte: Do autor (2021).

Caires et al. (2004) em um experimento sob um Latossolo argiloso em sistema de plantio direto 5 anos após a aplicação de diferentes doses de gesso agrícola (de até 12 t ha⁻¹), avaliando os teores nutricionais nos grãos de soja, relataram aumentos lineares nos teores de Ca e K. Para o Mg, foi relatado pelos autores um decréscimo linear à medida que se aumentou a dose de gesso. Essa diminuição do teor de Mg nas plantas se deve ao aumento da quantidade de Ca no solo competindo pelo sítio de absorção das plantas (TOMMA et al. 1999). Já, para o S, Caires et al. (2004), avaliando em 2 safras, não encontraram diferenças entre os tratamentos na primeira safra e um aumento linear de S no grão na segunda safra.

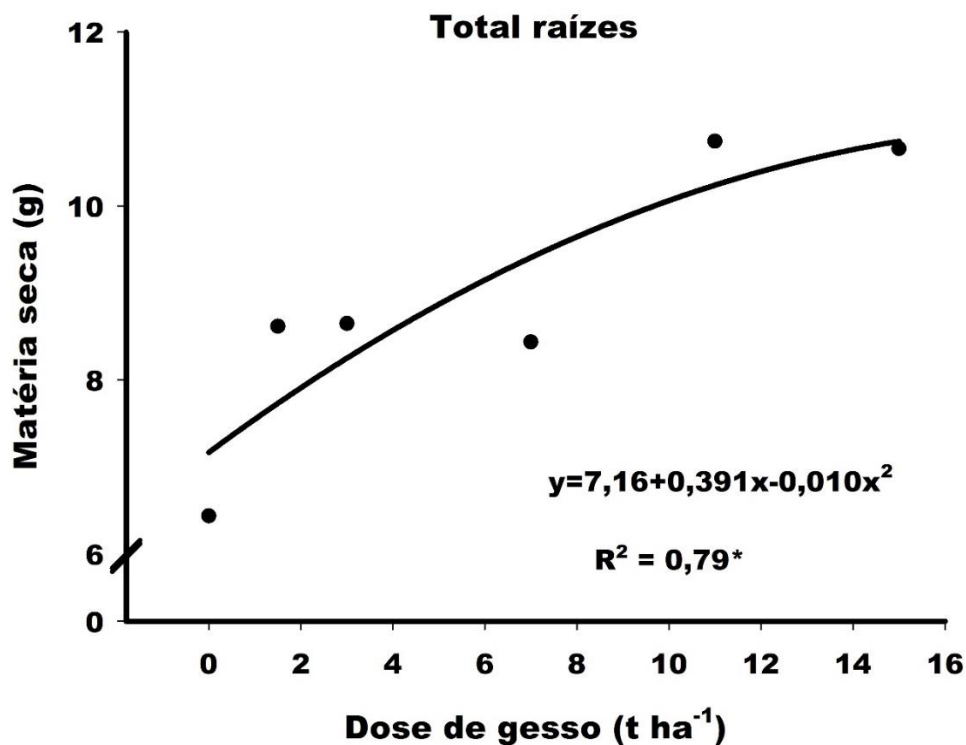
Em uma avaliação em condições de campo sob argissolo no norte de Paraguai, Fois et al. (2018) não encontraram diferenças significativas nos teores nutricionais de Ca, Mg, K e S em grãos de soja, porém, a dose máxima aplicada de gesso agrícola no experimento foi de 1,6 t ha⁻¹, dose essa muito menor que as doses testadas no presente estudo.

3.5 Distribuição do sistema radicular do feijoeiro nas colunas de solo

Os resultados da produção total de matéria seca de raízes nas colunas com 100 cm de profundidade estão apresentados na figura 7. A resposta do crescimento de raízes do feijoeiro aumentou de forma quadrática até a dose de 15 t ha⁻¹. Esses resultados estão relacionados com o maior desenvolvimento das plantas apresentados na figura 4, a qual mostra o aumento da produção de grãos também de forma linear, e o aumento da produção de parte aérea até a dose de 10,48 t ha⁻¹ de gesso. Além disso, esse resultado de produção total de raízes está ligado a uma melhor distribuição dos nutrientes nas camadas mais profundas, como mostrado

na figura 2, a qual mostrou que os teores de Ca, Mg, K e S aumentaram nas camadas mais profundas, principalmente até os 40 cm de profundidade.

Figura 7 – Produção total de matéria seca de raízes nas colunas com 100 cm de profundidade.



Legenda: Produção de matéria seca total de raízes nas colunas com 100 cm.

(*) Significativo ao nível de $P \leq 0,05$.

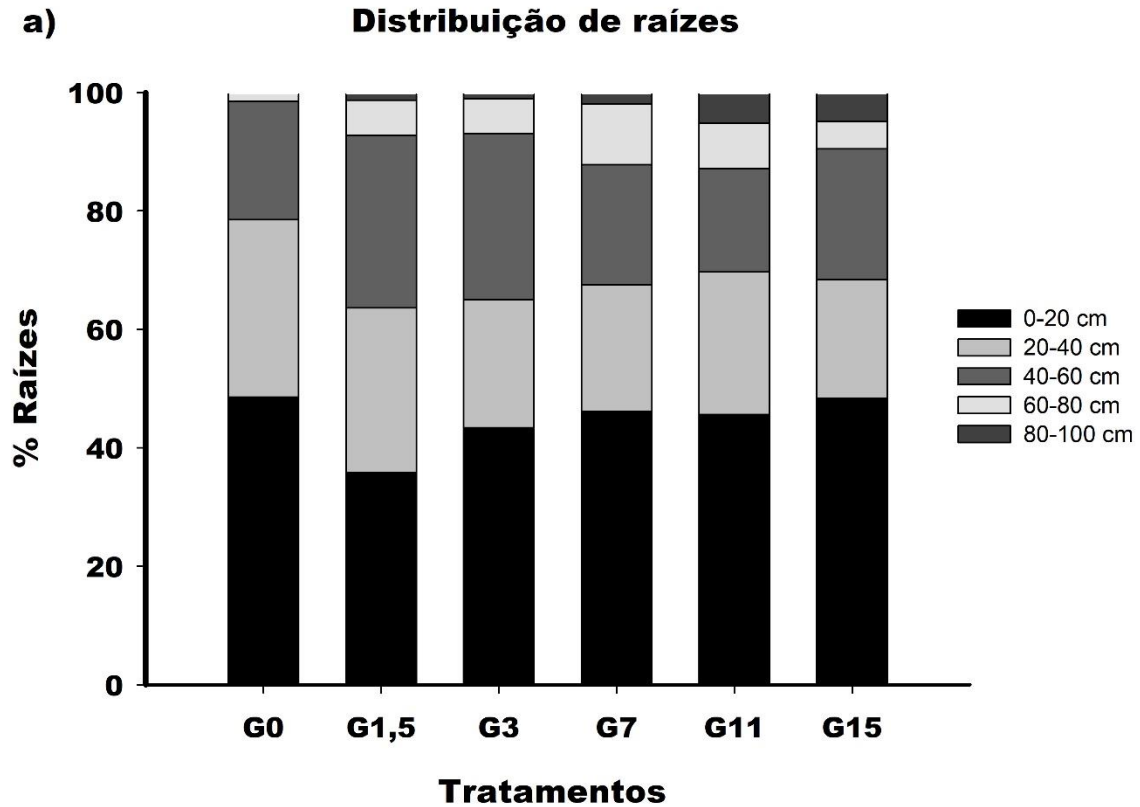
Fonte: Do autor (2021).

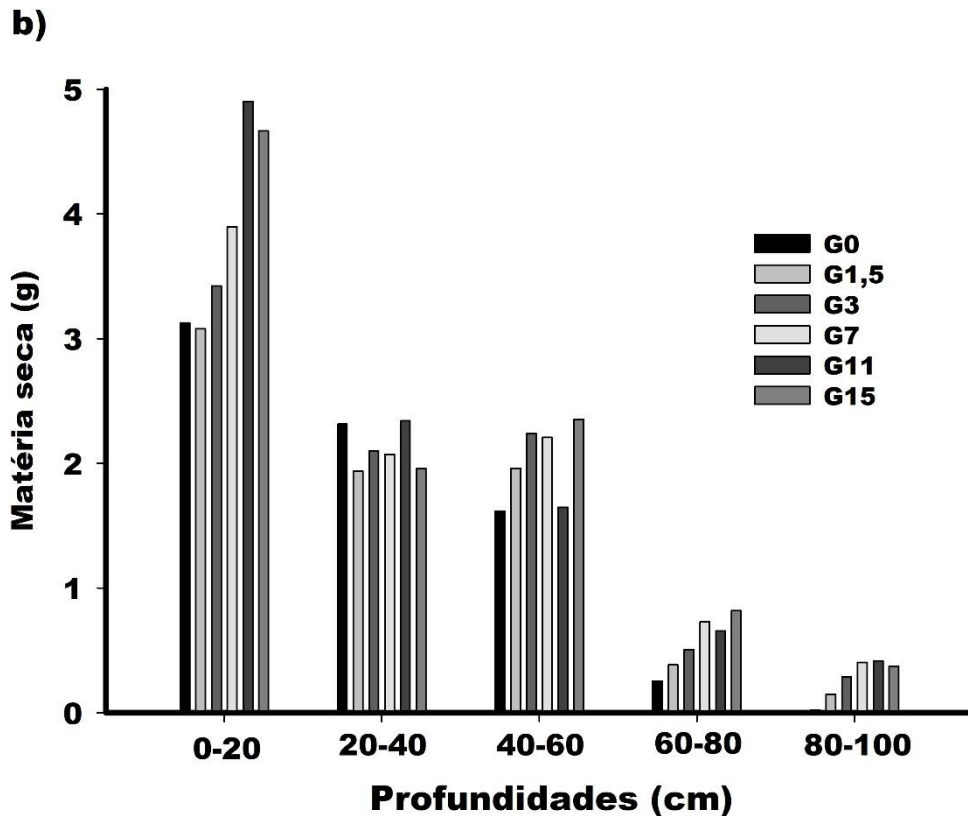
Clemente et al. (2017) avaliando o efeito de raízes de cana de açúcar com altas doses de gesso encontraram uma resposta quadrática ao crescimento de raízes em função de doses de gesso. Esses autores aplicaram até 20 t ha⁻¹ e o aumento do peso das raízes ocorreu até a dose de 12 t ha⁻¹. Carducci et al. (2014), avaliando a distribuição de raízes de cafeeiro em Latossolo com altas doses de gesso, também notaram efeitos positivos do gesso no crescimento e distribuição de raízes ao longo do perfil do solo.

Os resultados para a distribuição porcentual de raízes em diferentes profundidades ao longo da coluna com 100 cm estão apresentados na figura 8. No tratamento G0, não foram encontradas raízes na camada de 80-100 cm e apenas poucas raízes na camada de 60-80 cm. Já, nos tratamentos que receberam doses de gesso, as quantidades de raízes aumentaram nessas camadas mais profundas, principalmente nas maiores doses. As quantidades de raízes encontradas nas camadas abaixo de 40 cm aumentaram nos tratamentos que receberam gesso

em relação ao controle. Esse comportamento aconteceu devido ao maior fornecimento de nutrientes nas camadas mais profundas causada pela lixiviação dos elementos Ca, Mg, K e S para as camadas mais profundas conforme apresentado na figura 2, principalmente até os 40 cm de profundidade.

Figura 8 – Distribuição percentual de raízes em diferentes profundidades ao longo da coluna com 100 cm.





Legenda: Distribuição porcentual de raízes em diferentes profundidades nas colunas (a), quantidade total de raízes por profundidade (b).
 Fonte: Do autor (2021).

Estudos de Souza Lobato e Rein (2004) avaliando o efeito de aplicação de gesso na dose compatível com 50 vezes o teor de argila (de 20-40 cm de profundidade) mostraram o aumento da quantidade raízes até a profundidade de 75 cm, onde na dose controle as raízes não cresceram abaixo de 45 cm. Mesmo com pequenas quantidades de raízes abaixo de 80 cm nas doses 11 e 15, a importância dessas raízes pode fazer a diferença na absorção de água pelas plantas, na eventualidade de um veranico. Por essa razão, estudos simulando stress hídrico na fase de formação de grãos são necessários para justificar doses mais elevadas de gesso. Essas doses podem ser as únicas que dariam condições de salvar as plantas.

4 CONCLUSÃO

As doses de gesso influenciaram nos teores disponíveis de Ca, Mg, K e S ao longo do perfil do solo até a camada de 40-60 cm. O crescimento das plantas de feijão aumentou de forma quadrática, enquanto a produção de matéria seca de grãos aumentou de forma linear com o aumento das doses de gesso testadas. A dose de gesso que apresentou melhor resultado

foi de aproximadamente 11 t ha⁻¹, dose essa que é acima das recomendadas pelos métodos mais tradicionais.

O crescimento e distribuição de raízes foram afetados positivamente pelo aumento das doses de gesso aplicadas. A presença de gesso propiciou um aumento porcentual das raízes encontradas em maiores profundidades (60-80 e 80-100 cm).

REFERÊNCIAS

BRASIL, E. C.; CRAVO, M. da S.; VIEGAS, I. de J. M. (Ed.). Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará. 2. ed. rev. e atual. Brasília, DF: Embrapa, 2020.

CAIRES, E. F. et al. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 275-286, mar./abr. 2003.

CAIRES, E. F. et al. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 275-286, mar./abr. 2004.

CAIRES, E. F. et al. Surface application of lime for crop grain production under a no-till system. **Agronomy Journal**, v. 97, n. 3, p. 791-798, 2005.

CAIRES et al. Surface application of gypsum in low acidic Oxisol under no-till cropping system. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 68, n. 2, p. 45-53, mar./abr. 2011.

CAIRES E F, ZARDO FILHO R, BARTH G, JORIS H A W. Optimizing nitrogen use efficiency for no-till corn production by improving root growth and capturing NO₃-N in subsoil. **Pedosphere**. 26(4): 474-485.2016.

CARDUCCI et al., Distribuição espacial das raízes de cafeeiro e dos poros de dois Latossolos sob manejo conservacionista. **R. Bras. Eng. Agríc. Amb.** 18:270-278, 2014.

CARVALHO, M. C. S.; NASCENTE, A. S. Application of lime, phosphogypsum and fertilization rates affect soil fertility and common bean development in no-tillage system in a Cerrado Oxisol. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 40, p. e39322-e39322, 2018.

CLEMENTE, P. R. Aprígio et al. Crescimento radicular e produção de cana-de-açúcar em função de doses crescentes de gesso. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, p. 110-117, 2017.

FAVARETTO, N. et al. Gypsum amendment and exchangeable calcium and magnesium effects on plant nutrition under conditions of intensive nutrient extraction. **Soil Science**, v. 173, n. 2, p. 108-118, 2008.

FERRAZ, RAUL MAGALHÃES. **Efeitos a longo prazo da aplicação de altas doses de gesso nas características químicas em perfil de latossolo cultivado com café. (2017). 50p Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2017.**

FOIS, D. A. F. et al. Resposta da soja ao gesso agrícola em plantio direto no Paraguai. **Revista Ceres**, v. 65, p. 450-462, 2018.

GALON, J. A.; BELLINGIERI, Paulo Affonso; ALCARDE, José Carlos. Efeito de modos e épocas de aplicação de gesso e calcário sobre a cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Carioca-80. **Scientia Agricola**, v. 53, p. 119-125, 1996.

HAVLIN, John L. Soil fertility and nutrient management. **Upper Saddle River**, NJ, USA, p. 460-469, 2014.

KOST, D. et al. Effects of flue gas desulfurization and mined gypsums on soil properties and on hay and corn growth in eastern Ohio. **Journal of environmental quality**, v. 43, n. 1, p. 312-321, 2014.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; RAMOS, S. J. The saga of the agricultural development of the Brazilian Cerrado. **Electronic International Fertilizer Correspondent**, n. 32, p. 29-57, 2012.

MACANA, Y A M.; TOLEDO, F H S F. FERRAZ, A V.; GONCALVES, J L M.; LOPEZ, S M D.; CUBILLOS, C A B.; ROJAS, A N S.; BOLOGNANII, H A. Soil fertility and fine root distribution after gypsum application in Eucalyptus plantations with different tolerance to water deficit. **New Forests**, 51:1039–1054, 2020.

MALAVOLTA, E. ABC da análise de solo e folhas: amostragem, interpretação e sugestões de adubação. São Paulo: **Ed. Agronômica Ceres**, 1992.

MICHALOVICZ, L. et al. Soil fertility, nutrition and yield of maize and barley with gypsum application on soil surface in no-till. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa**, v. 38, n. 5, p. 1496-1505, set./out. 2014.

MICHALOVICZ, L MÜLLER, MARCELO M. LOPES; TORMENA, CASSIO ANTONIO; DICK, WARREN A.; VICENSI, MARCELO; MEERT, LEANDRO. Soil chemical attributes, nutrient uptake and yield of no-till crops as affected by phosphogypsum doses and parceling in southern Brazil. **Archives of Agronomy and Soil Science** v. 65, p. 1-15, 2018.

MICHALOVICZ, L. et al. Soil chemical attributes, nutrient uptake and yield of no-till crops as affected by phosphogypsum doses and parceling in southern Brazil. **Archives of agronomy and soil science**, v. 65, n. 3, p. 385-399, 2019.

NORA, D. AMADO T.J.C. NICOLOSO R.S. MAZUCO A.C.B. PICCIN M. Mitigation of the Gradient of chemical properties in the rooting zone of dystrophic Oxisols by gypsum and lime inputs under a no-till system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2017.

RAMOS, B. Z. et al. Doses de gesso em cafeeiro: influência nos teores de cálcio magnésio potássio e pH na solução de um Latossolo Vermelho Distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa**, v. 37, n. 4, p. 1018-1026, jul./ago. 2013.

RAMOS, B. Z. et al. Ionic speciation in a dystrophic red latosol under coffee crop and high doses of gypsum. **Coffee Science, Lavras**, v. 14, n. 3, p. 281 - 290, jul./sep. 2019.

RAMPIM, L. et al. Atributos químicos de solo e resposta do trigo e da soja ao gesso em sistema semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa**, v. 35, n. 5, p. 1687-1698, set./out. 2011.

RAUT, Y.Y. et al. Soybean yield response to gypsum soil amendment, cover crop, and rotation. **Agricultural & Environmental Letters**, v. 5, n. 1, p. e20020, 2020.

RODRIGUES, L. U.; SILVA, R. R.da. Boron availability in building up fertility in Cerrado soil of Tocantins. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 51, n. 5, p. 595-603, 2020.

SILVA, E. A. et al. Aggregate stability by the "high energy moisture characteristic" method in an oxisol under differentiated management. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 5, p. 1633-1642, 2014.

SILVA, É.A.; CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; SILVA, B. M.; SERAFIM, M. E. Estrutura de solos em manejo conservacionista: diagnóstico visual, laboratorial, caracterização e inter-relações. **Scientia Agraria**. v. 18, p. 61-73, 2017.

SILVA, F. M. et al. Using proximal sensors to assess pedogenetic development of Inceptisols and Oxisols in Brazil. **Geoderma Regional**. 2022.

SOUZA, D. M. G.; LOBATO, S.; REIN, T. A. Uso de gesso agrícola nos solos do Cerrado. Planaltina: **Embrapa Cerrados**, 2005.

SUMNER, M. E. et al. Amelioration of an acid soil profile through deep liming and surface application of gypsum. **Soil Science Society of America Journal**, v. 50, n. 5, p. 1254-1258, 1986.

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMA, G.K.; FONTANA, A. TEIXEIRA, W.G.– **Manual de métodos de análise do solo. 3. ed. Brasília: Embrapa, 573 p. 2017.**

TIECHER T, PIAS OHC, BAYER C, MARTINS AP, DENARDIN LGO, ANGHINONI I. Crop response to gypsum application to subtropical soils under no-till in Brazil: a systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** 2018.

TOMA, M. et al. Long-term effects of gypsum on crop yield and subsoil chemical properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, n. 4, p. 891-895, 1999.

VAN RAIJ, B. Gesso na agricultura. **Campinas: Instituto Agronômico, 2008.**

WEBER, O. L. S. et al. Cargas elétricas estruturais e variáveis de solos tropicais altamente intemperizados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 6, p. 867-873, 2005.

ZANDONÁ, R. R. et al. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, n. 2, p. 128-137, abr./jun. 2015.

ZOCA, S.M.; PENN, C. An important tool with no instruction manual: a review of gypsum use in agriculture. **Adv Agro.** 2017

ARTIGO 3: Especiação iônica da solução de Latossolo após 76 meses da aplicação de altas doses de gesso em lavoura cafeeira

Norma NBR 6022 (ABNT 2003) (Versão preliminar)

Raul Magalhães Ferraz¹, Guilherme Lopes¹

¹ Departamento de Ciências dos Solos, Universidade Federal de Lavras (UFLA), MG, Brasil

RESUMO

A produção agrícola na região do cerrado brasileiro vem aumentando, principalmente nos Latossolos da região. Apesar de serem solos que apresentam potencial produtivo, eles necessitam de correções prévias para mitigar as limitações químicas, que vão desde a camada superficial até maiores profundidades, o que é importante para o crescimento de raízes e para que sejam obtidas altas produtividades. Uma alternativa para mitigação da acidez que atinge o subsolo é a aplicação de gesso agrícola, um subproduto da indústria de fertilizantes fosfatados. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a especiação iônica da solução do solo em perfil do solo (até 245 cm) após 76 meses da aplicação de altas doses de gesso agrícola em uma lavoura de café implantada em Latossolo Vermelho distrófico. O experimento foi composto de tratamentos com 4 doses de gesso (0, 7, 14 e 56 t ha⁻¹), sendo as amostras de solo coletadas aos 76 meses após a aplicação dos tratamentos, nas seguintes profundidades: 15-25 cm, 35-45 cm, 75-85 cm, 125-135 cm, 165-185 cm e 225-245 cm. Por meio de pasta saturada, foram extraídas as soluções do solo, nas quais se avaliou a presença de espécies químicas, tais como as bases Ca, Mg e K, bem como do ânion SO₄²⁻. Os dados de especiação desse trabalho foram também comparados com outros avaliados da mesma área experimental avaliados após 16 meses da aplicação das doses de gesso. Constataram-se, para todas as doses de gesso e profundidades, que a maior parte dos elementos avaliados se encontra na forma livre na solução do solo (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ e SO₄²⁻), corroborando com as avaliações realizadas aos 16 meses após a aplicação do gesso.

Palavras chave: Lixiviação, perfil do solo, cafeeiro, bases disponíveis na solução

ABSTRACT

Agricultural production in Brazilian thick region has been increasing, especially under Latosols. Although being soils with high productive potential, they need previous corrections to mitigate chemical limitations that occur from the superficial soil layer till greater soil depths, which is important to the root growth and to achieve high crop yield. An alternative to mitigate the acidity that reaches the subsoil is the application of agricultural gypsum, a by-product of the phosphate fertilizer industry. The present study aimed to evaluate the ionic speciation of the soil solution through the soil profile (up to 245 cm) after 76 months of the application of high doses of agricultural gypsum in a coffee crop under a dystrophic Red Latosol. The experiment consisted of treatments with 4 gypsum doses (0, 7, 14 and 56 t ha⁻¹), and soil samples were collected at 76 months after the application of the treatments, at the following soil depths: 15-25 cm, 35-45 cm, 75-85 cm, 125-135 cm, 165-185 cm, and 225-245 cm. Soil solutions were extracted using saturated paste, in which the presence of chemical species, such as the bases Ca, Mg, and K, as well as the anion SO₄²⁻, was evaluated. Speciation data from this work were also compared with previous assessment carried in the same experimental area 16 months after the gypsum application. For all gypsum doses and soil layers evaluated, most of the assessed elements were found in their free forms in the soil solution (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ and SO₄²⁻), agreeing with the speciation analyses carried out at 16 months after the gypsum application.

Keywords: Leaching, soil profile, coffee, available bases in solution

1 INTRODUÇÃO

O Cerrado brasileiro vem sendo cada vez mais explorado para uso agrícola (SPERA, 2017). Aproximadamente 46% dos solos que ocupam essa região são Latossolos (FREITAS et al., 2010). Esses solos apresentam alto potencial produtivo, em razão da facilidade de mecanização, devido à topografia suavizada e características físicas propícias. Porém, são pobres em nutrientes e apresentam limitações em relação à alta acidez e elevados teores de alumínio em todo o perfil (LOPES; GUILHERME, 2016). Essas características tornam a correção e a construção da fertilidade práticas imprescindíveis para o alcance de elevadas produtividades das culturas cultivadas nos Latossolos do cerrado brasileiro, como, por exemplo, a cultura do cafeeiro.

A produção de café para a safra de 2020/2021 em Minas Gerais está estimada entre 30,71 e 32,08 milhões de sacas beneficiadas (CONAB, 2021), sendo que dessa produção 5,82 a 6,07 milhões de sacas serão produzidas no cerrado mineiro (CONAB, 2020). Aproximadamente 20% da produção de café do Brasil são produzidos no estado de Minas Gerais.

A planta do cafeeiro necessita de solos profundos e férteis para seu melhor desenvolvimento e produção (MATIELLO, 2016). Portanto, para explorar o maior potencial dos insumos de adubação, necessitam de correção da acidez tanto nas camadas superficiais como nas subsuperficiais (LOPES; GUILHERME, 2016). O calcário tem sido o insumo mais utilizado para correção nas camadas superficiais, sendo além de corretivo da acidez, fonte de Ca e Mg (MATIELLO, 2016). Por outro lado, para a atenuação dos problemas de acidez nas camadas mais profundas, a aplicação do gesso agrícola tem sido recomendada. O gesso agrícola, que é basicamente sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), ao ser aplicado no solo e em contato com a umidade, se dissocia em Ca^{2+} e SO_4^{2-} , permanecendo parte como CaSO_4^0 . Como par iônico, o gesso é deslocado para camadas mais profundas, onde continua se dissociando e fornecendo Ca^{2+} e SO_4^{2-} . Assim, o cálcio é carregado para camadas mais profundas juntamente com o sulfato, o qual se liga ao alumínio, tornando-o indisponível (TIECHER et al. 2019).

Existem métodos tradicionais e já amplamente utilizados para a recomendação de gessagem, a exemplo do método descrito por Souza e Lobato (2004), no qual a necessidade de gessagem é calculada em função do teor de argila do solo (camada subsuperficial) pela fórmula: $\text{NG} = 50 \times \% \text{ de argila em camadas subsuperficiais}$. Contudo, há estudos que

demonstraram que aplicações de doses superiores às recomendadas por este método apresentaram efeitos vantajosos ao cultivo de plantas, como uma maior produtividade por área e maior resistência a períodos de seca devido ao maior crescimento de raízes (CRUSCIOL et al. 2016, MACANA et al. 2020).

Alguns produtores, da região do Alto São Francisco em Minas Gerais, adotaram um sistema de produção em que são aplicadas doses mais elevadas de gesso agrícola. Segundo Serafim et al. (2011), nesse sistema faz-se a implantação e condução de lavouras comerciais diferente dos sistemas convencionas na cafeicultura, principalmente pelo uso das elevadas doses de gesso.

Porém, o aumento da concentração de Ca na solução do solo (fornecido pelo gesso), pode causar desbalanços nutricionais na solução do solo (RAMOS, et al. 2019). As plantas absorvem os nutrientes, em sua maioria, pelas raízes e, mais precisamente, a partir da fase aquosa do solo (solução do solo) (ABDOLLAHPOUR, 2020). Além de ter os nutrientes disponíveis para as plantas, nessa fase ocorre a maioria das reações químicas envolvendo os elementos presentes (ESSINGTON, 2004). Assim, o estudo da concentração de nutrientes e especiação química da solução do solo em áreas que receberam elevadas doses de gesso agrícola torna-se relevante.

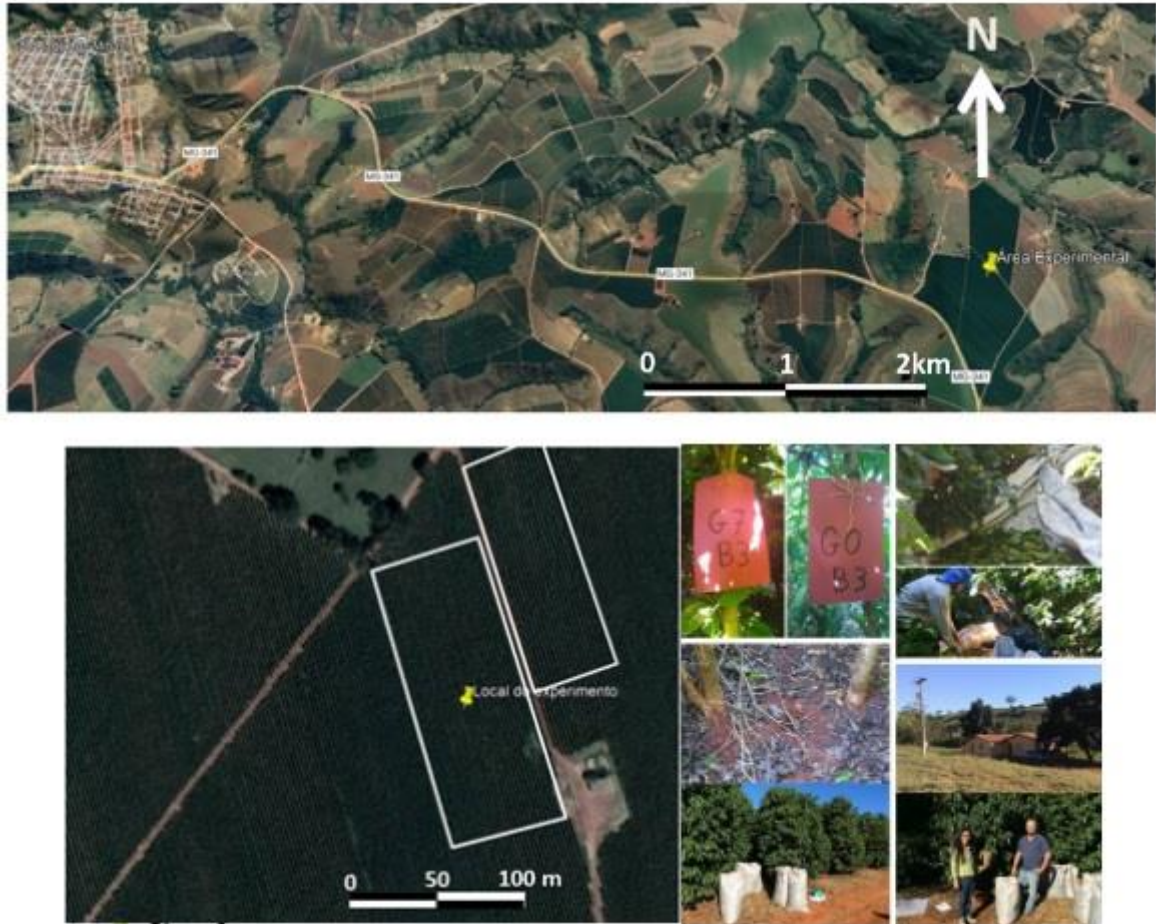
O objetivo deste trabalho foi avaliar a especiação iônica das bases Ca, Mg e K, bem como do ânion SO_4 na solução do solo em perfil do solo (até 245 cm) após 76 meses da aplicação de altas doses de gesso agrícola, acima das recomendadas tradicionalmente, em uma lavoura de café implantada em Latossolo Vermelho distrófico. Estudos anteriores na mesma área experimental realizaram a especiação desses mesmos elementos em amostras coletadas 16 meses após a aplicação do gesso agrícola (RAMOS et al., 2019). Assim, esse estudo também visou a dar continuidade nas medições, comparando os resultados e avaliando as alterações ao longo do tempo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

As amostras de solo do presente estudo foram coletadas em perfil de Latossolo cultivado com café, na área experimental, com 18% de declividade, dentro da fazenda AP (Agropecuária Piumhi), no município de São Roque de Minas, coordenadas 20° 115' S, 46° 18' O, no centro-oeste de Minas Gerais (Figura 1). A região apresenta precipitação média de

1.344 mm ao ano, altitude de 900 m, temperatura média de 20,7 °C e uma umidade relativa média de aproximadamente 60% (MENEGASSE et al. 2002).

Figura 1 – Localização experimental.



Legenda: Localização da área experimental em lavoura comercial de café implantada no município de São Roque de Minas, coordenadas médias 20° 115' S, 46° 18' O, região fisiográfica do Alto São Francisco.

Fonte: Imagens do Google Earth (2022)

A lavoura foi implantada em 2008, com o cultivar Catucaí Amarelo Multilínea, sob Latossolo Vermelho distrófico típico de mineralogia gibbsítico-oxídico e textura muito argilosa (RAMOS et al. 2013). Na implantação, foi realizada a correção da acidez do solo com calcário e aplicação em área total de 2 t ha⁻¹ de gesso agrícola. Após a implantação da cultura, foi implantada Braquiária (*Urochloa ruziziensis*) nas entrelinhas do cafeeiro como cultura de cobertura. Para correção e adubação, foi utilizado como base o manual de recomendações para o estado de Minas Gerais (RIBEIRO et al., 1999). Detalhes adicionais

sobre todas as práticas de manejo da implantação podem ser encontrados no trabalho conduzido por Serafim et al. (2011).

Sete meses após o plantio, foram aplicadas as doses de gesso na linha do cafeeiro, em uma faixa de aproximadamente 50 cm de largura, sendo posteriormente realizada a cobertura do gesso por operação de amontoa. As doses de gesso usadas nesse trabalho foram: G-0: sem gesso na linha de plantio; G-7: 7 t ha⁻¹ de gesso na linha de plantio (1,75 kg m⁻¹); G-14: 14 t ha⁻¹ na linha de plantio (3,5 kg m⁻¹); G-56: 56 t ha⁻¹ de gesso na linha de plantio (14 kg m⁻¹), com 3 repetições distribuídas em delineamento em blocos ao acaso (DBC) em razão da declividade.

Para a avaliação da solução do solo, amostras de solos foram coletadas 76 meses após a aplicação das doses de gesso na linha do cafeeiro nas seguintes profundidades: 15-25 cm, 35-45 cm, 75-85 cm, 125-135 cm, 165-185 cm e 225-245 cm. As amostras foram secas ao ar e passadas em peneiras de 2 mm de abertura (TFSA), guardadas em sacos plásticos a temperatura ambiente para posteriores análises.

A solução do solo de cada amostra (dose de gesso e profundidade do solo coletada) foi extraída pelo método da pasta de solo saturado, adaptado do extrato aquoso (WOLT, 1994), conforme método realizado em estudo prévio na mesma área experimental com amostragens 16 meses após a aplicação das doses de gesso (RAMOS et al. 2019). Para a extração da solução do solo, foram utilizados 300 cm³ de amostra de solo em um recipiente plástico onde foi adicionada lentamente água ultrapura e homogeneizado o solo até atingir o ponto de saturação. Após um período de repouso de 16 h, o solo saturado foi colocado em um sistema de funil de Buchner com papel filtro, acoplado a um kitassato, sendo a solução extraída no vácuo por um período de 12 h. As soluções extraídas foram posteriormente filtradas em uma membrana de celulose de 0,45 µm de abertura de malha, obtendo-se os extratos da solução do solo.

As amostras da solução do solo foram avaliadas quanto ao pH usando pHmetro de bancada Mettler Toledo, teores de Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, NO₃⁻, NH₄⁺, F⁻, PO₄³⁻, Cl⁻ e NO₂⁻, analisados em um cromatógrafo iônico modelo ICS1100 Dionex, com amostrador AS-DV automático e detector de condutividade, teores de Cu²⁺, Fe³⁺, Mn²⁺ e Zn²⁺, determinados por espectrometria de emissão atômica de plasma acoplado individualmente ICP-OES e quanto aos teores de carbono orgânico dissolvido (COD), que foram estimados pela diferença do teor de carbono inorgânico pelo teor de carbono total quantificado pelo analisador de carbono modelo TOC-V CPH.

A especiação química da solução do solo, com foco para as bases Ca, Mg e K, bem como para o ânion sulfato, foi realizada usando o software Visual Minteq (GUSTAFFSON, 2018). Os resultados da especiação química encontrados nessa avaliação, aos 76 meses após a aplicação das doses do gesso, foram comparados com os resultados encontrados por Ramos et al. (2019) usando amostras de solo coletadas 16 meses após a aplicação do gesso.

De posse dos resultados dos teores dos elementos, foi realizada a análise de variância e, quando foi encontrada diferença significativa a 5% de probabilidade, foi realizado o teste de médias SNK ($p \leq 0.05$) para comparar os efeitos das doses de gesso nas bases Ca, Mg e K, assim como no ânion sulfato dentro de cada profundidade. Utilizou-se para as análises estatística o software SISVAR 5.6 (FERREIRA, 2014). As figuras foram geradas a partir do software Sigma Plot®.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados encontrados para o ânion sulfato estão descritos na tabela 1. Na média, os percentuais das espécies encontradas foram 77,96, 16,89, 5,24 e 0,89% para SO_4^{2-} livre, CaSO_4^0 , MgSO_4^0 e outros, respectivamente. Em todas as doses e profundidades avaliadas, os maiores percentuais encontrados na especiação foram para a forma livre de SO_4^{2-} , corroborando com os resultados encontrados por Ramos et al. (2019), em estudos prévios realizados na mesma área aos 16 meses após a aplicação de gesso agrícola (Figura 1). Resultados semelhantes também foram encontrados por Tiecher et al. (2019) e Zambrosi et al. (2017) avaliando áreas com o plantio direto consolidado.

Tabela 1: Teores médios de SO_4^{2-} na solução do solo e suas respectivas espécies químicas nas diferentes profundidades avaliadas.

Prof. (cm)	Tratamentos	SO_4^{2-} mg dm ⁻³	SO_4^{2-} MgSO ₄ ⁰ CaSO ₄ ⁰ Outros ^(*)			
			-----Espécies (%) -----			
15-25	G-0	1,46 b	93,68	1,55	3,51	1,26
	G-7	98,20 b	87,65	1,27	9,68	1,4
	G-14	99,99 b	70,20	0,61	28,22	0,96
	G-56	3184,44 a	59,74	3,19	35,88	1,19
35-45	G-0	5,06 b	92,66	0,87	5,57	0,9
	G-7	208,84 b	90,63	2,01	5,95	1,41

	G-14	189,55 b	66,48	3,57	29,25	0,7
	G-56	3022,03 a	61,31	0,43	36,7	1,56
75-85	G-0	9,37 b	82,17	11,42	5,77	0,64
	G-7	245,25 b	79,23	3,11	14,74	2,92
	G-14	272,10 b	62,96	3,05	33,35	0,64
	G-56	1897,68 a	75,65	1,95	21,42	0,98
125-135	G-0	0,81 b	77,38	10,78	11,36	0,48
	G-7	19,81 b	69,88	7,91	21,64	0,57
	G-14	3,17 b	63,37	5,95	30,59	0,09
	G-56	770,02 a	63,84	4,56	30,89	0,71
165-185	G-0	0,45 ^{ns}	75,01	13,02	11,32	0,65
	G-7	1,16 ^{ns}	75,01	13,02	11,32	0,65
	G-14	0,02 ^{ns}	78,28	8,96	12,15	0,61
	G-56	51,81 ^{ns}	63,05	5,54	31,22	0,19
225-245	G-0	0,37 ^{ns}	99,00	0,2	0,27	0,53
	G-7	4,12 ^{ns}	89,35	8,52	0,97	1,16
	G-14	0,07 ^{ns}	98,11	0,18	1,04	0,67
	G-56	1,80 ^{ns}	72,48	14,20	12,75	0,57
Valores médios			76,96	5,24	16,89	0,89

Letras iguais na mesma coluna, em cada profundidade avaliada, não diferenciam entre si pelo teste de médias SNK ($p \leq 0.05$). (*) Outras formas encontradas foram HSO_4^- , NaSO_4^- , KSO_4^- e NH_4SO_4^- . (ns) Diferença não significativa a 5% de probabilidade.

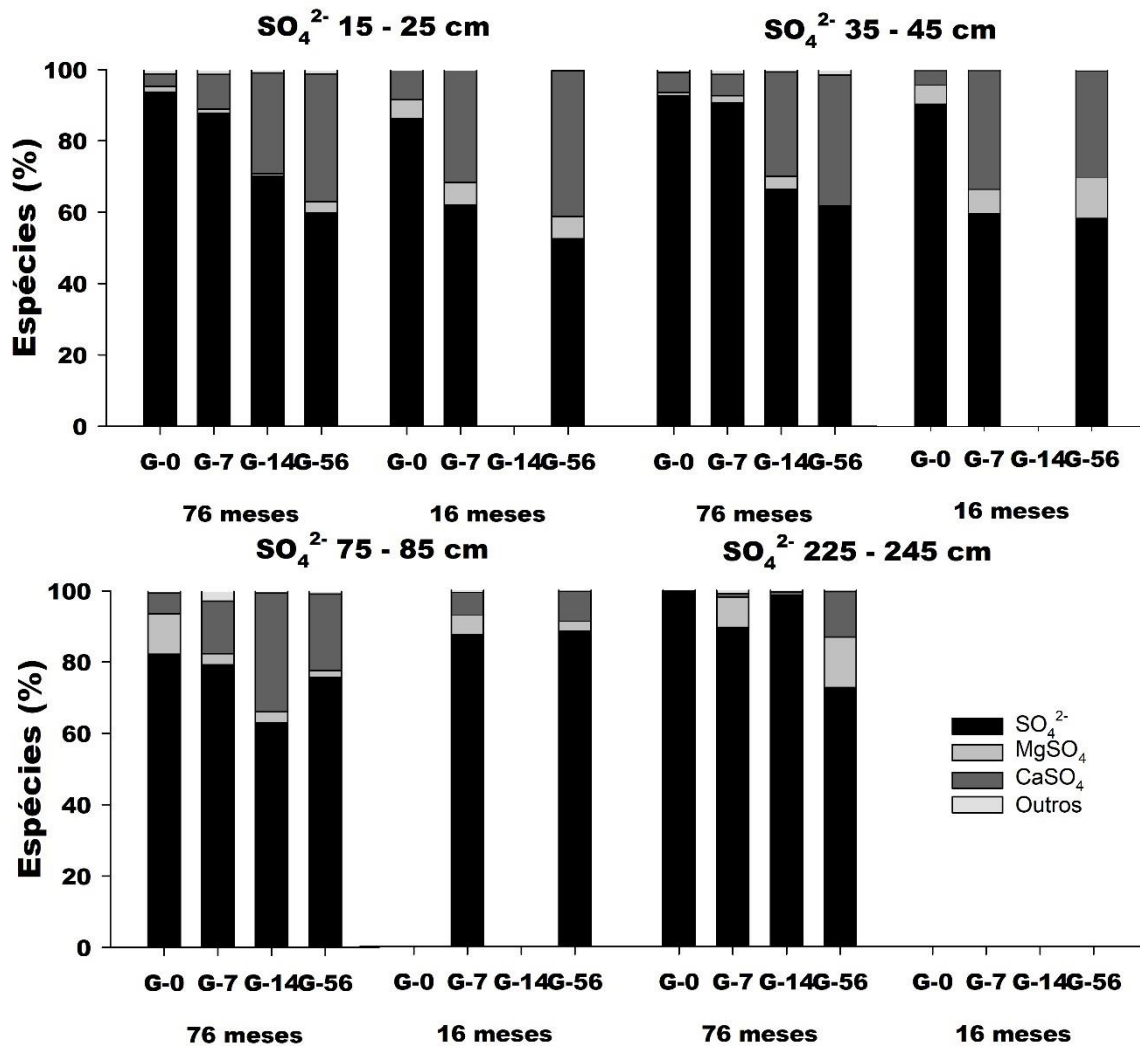
Fonte: Do autor.

Nota-se que, com aumento da dose de gesso agrícola, os percentuais da forma CaSO_4^0 aumentam em todas as profundidades. Comparando as duas amostragens realizadas (Figura 2) as porcentagens da espécie iônica CaSO_4^0 diminuíram com o tempo até a profundidade de 45 cm, indicando a dissolução do gesso agrícola, corroborando com resultados dos trabalhos de Crusciol et al. (2016), Bossolani et al. (2020) e Macana et al. (2020), onde observaram maior efeito do gesso agrícola com aumento do tempo da aplicação no solo.

Na camada de 15-25 cm, os percentuais de SO_4^{2-} livre variaram de 59,74 a 93,68%, sendo os menores valores encontrados com o aumento da dose de gesso aplicada, visto que a composição do gesso é basicamente CaSO_4^0 (ZOCA; PEN, 2017). Por essa razão e ao contrário do que ocorreu para o sulfato, os percentuais da espécie de CaSO_4^0 , aumentaram com dose de

gesso, indicando que o tempo não foi suficiente para total dissolução do gesso agrícola ou possa ter ocorrido a precipitação do Ca^{2+} com oSO_4^{-2} na solução do solo. Na comparação com os resultados encontrados por Ramos et al. (2019), houve uma diminuição nas porcentagens do CaSO_4 indicando que com o passar do tempo o gesso agrícola está se solubilizando.

Figura 2 – Espécies químicas do SO_4^{2-} em profundidade, comparando duas avaliações.



Legenda: Espécies químicas do SO_4^{2-} em profundidade, comparando duas avaliações.

* Dados da avaliação realizadas aos 16 meses, adaptados de Ramos et al (2019). Aos 16 meses não foi avaliado o tratamento G-14. Aos 16 meses não foi encontrado sulfato na camada 225-245 cm.

Fonte: Do autor (2021).

Nas camadas mais profundas, no geral, a presença do par iônico CaSO_4^0 foi maior que MgSO_4^0 nas duas avaliações realizadas, ocorrendo devido a maior concentração e afinidade de ligação do SO_4^{2-} com o Ca (TIECHER et al., 2019). Comparando com os resultados de Ramos et al. (2019) os valores para o par iônico MgSO_4 diminuíram com o tempo, mostrando efeito da

dissociação do que ocorreu após a formação no solo. Porém, na camada de 225 a 245 cm para o tratamento G-56 o percentual de $MgSO_4^0$ aumentou em relação as doses mais baixas na avaliação aos 76 meses, indicando que pode ter ocorrido uma maior lixiviação do Mg^{2+} causado pelo alto teor de SO_4^{2-} nesse tratamento, corroborando com avaliações realizadas na mesma área por Ferraz (2017), onde foi encontrado no teor disponível no solo e na solução.

Na camada de 75 a 85 cm não foi encontrado SO_4^{2-} no tratamento G-0, nos tratamentos G-7 e G-56 o teor livre foi maior na avaliação aos 16 meses. Na avaliação aos 76 meses, os maiores valores dos pares iônicos $CaSO_4^0$ e $MgSO_4^0$ comparados a primeira avaliação aos 16 meses após a aplicação dos tratamentos indicam que o gesso ainda está reagindo e solubilizando íons na solução do solo, o que corrobora com outros estudos (CRUSCIOL et al 2016, BOSSOLANI et al. 2020, MACANA et al. 2020, TIECHER et al., 2019). Na camada mais profunda, de 225 a 245 cm de profundidade, o SO_4^{2-} livre foi a espécie mais abundante em todos os tratamentos na avaliação aos 76 meses, ao passo que na primeira avaliação realizada por Ramos et al. (2019) não foi encontrado sulfato nessa profundidade.

Os resultados para o cátion Mg^{2+} estão apresentados na tabela 2. Em média, os valores foram 91,25, 7,88, 0,38 e 0,47% para Mg^{2+} livre, $MgSO_4^0$, Mg-COD e outros respectivamente. A forma livre Mg^{2+} foi a principal encontrada em todos os tratamentos avaliados. Nas profundidades de 15-25, 35-45, 75-85 e 125-135 cm, as porcentagens de $MgSO_4^0$ foram maiores no tratamento G-56, indicando uma maior formação deste par iônico devido à alta presença do SO_4^{2-} advindo do gesso agrícola (RAMOS et al., 2019).

Tabela 2: Teores médios de Mg^{2+} na solução do solo e suas respectivas espécies químicas nas diferentes profundidades avaliadas.

Prof. (cm)	Tratamentos	Mg^{2+} mg dm ⁻³	-----Espécies (%) -----			
			Mg^{2+}	$MgSO_4^0$	Mg-COD	Outras (*)
15-25	G-0	3,53 b	98,50	0,16	1,16	0,18
	G-7	4,17 b	91,69	7,60	0,55	0,16
	G-14	3,00 b	94,66	5,16	0,15	0,03
	G-56	72,24 a	64,35	35,61	0,04	0,00
35-45	G-0	1,95 ^{ns}	98,52	0,57	0,86	0,05
	G-7	7,29 ^{ns}	84,50	14,60	0,57	0,33

	G-14	21,73 ^{ns}	91,82	7,88	0,09	0,21
	G-56	9,28 ^{ns}	63,70	35,63	0,03	0,64
75-85	G-0	36,61 ^{ns}	98,77	0,74	0,38	0,11
	G-7	15,33 ^{ns}	86,80	12,60	0,061	0,54
	G-14	22,47 ^{ns}	90,06	9,34	0,08	0,52
	G-56	25,63 ^{ns}	62,24	36,62	0,06	1,08
125-135	G-0	39,92 ^{ns}	99,69	0,05	0,20	0,06
	G-7	40,32 ^{ns}	98,79	0,98	0,11	0,12
	G-14	32,62 ^{ns}	99,79	0,14	0,05	0,02
	G-56	46,29 ^{ns}	79,38	19,21	0,05	1,36
165-185	G-0	15,51 c	99,65	0,07	0,23	0,05
	G-7	54,86 a	99,65	0,07	0,23	0,05
	G-14	28,91 bc	99,70	0,00	0,20	0,10
	G-56	41,63 ab	95,71	1,74	0,04	2,51
225-245	G-0	0,26 c	97,90	0,05	1,794	0,26
	G-7	22,62 b	99,24	0,40	0,26	0,1
	G-14	0,32 c	97,92	0,01	1,96	0,11
	G-56	78,85 a	97,05	0,08	0,12	2,75
Valores médios			91,25	7,88	0,38	0,47

Letras iguais na mesma coluna, em cada profundidade avaliada, não diferenciam entre si pelo teste de médias SNK ($p \leq 0.05$). (*) Outras formas encontradas foram MgF^+ e $MgCl^+$. (ns) Diferença não significativa a 5% de probabilidade.

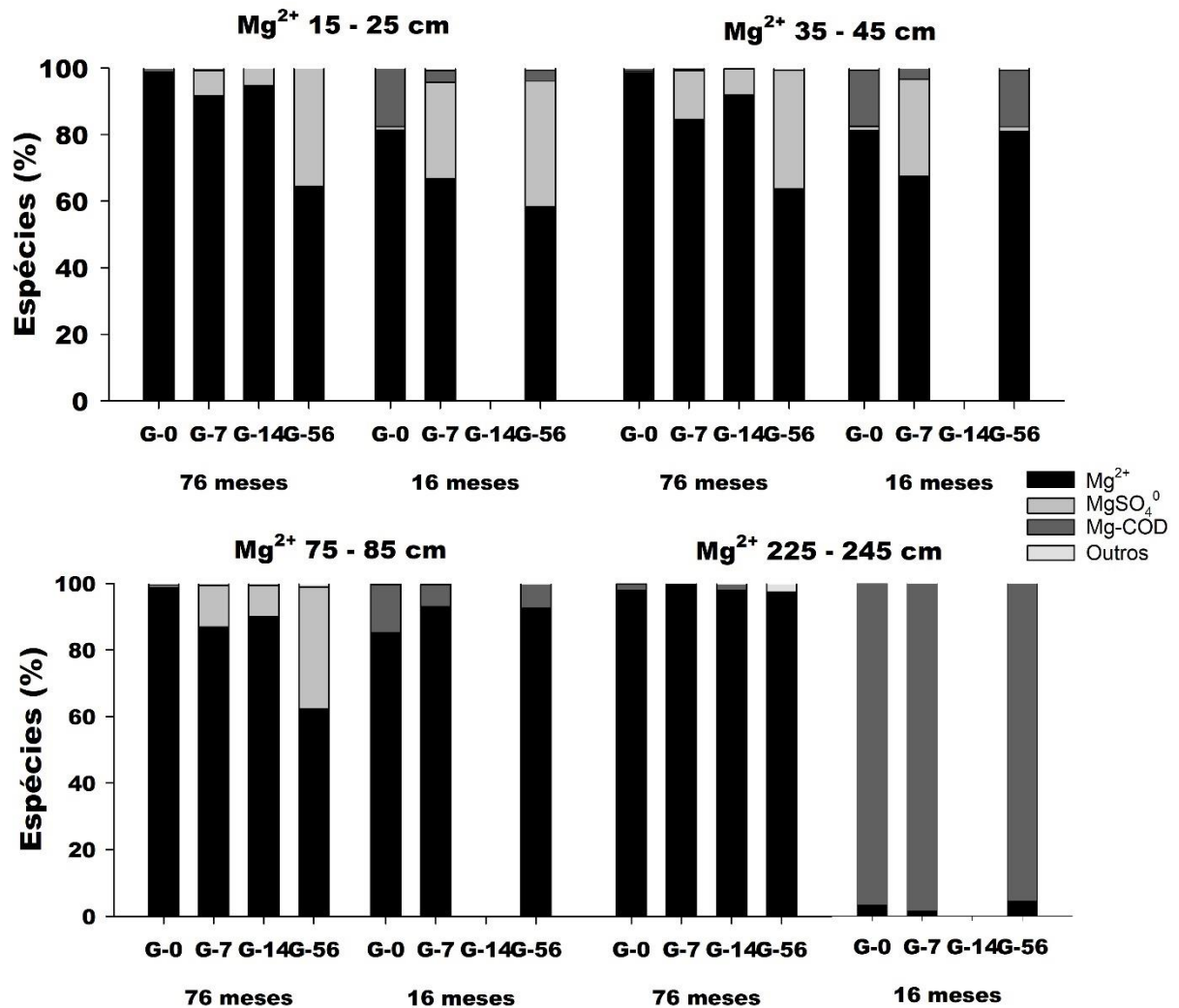
Fonte: Do autor (2021).

Trabalhos como de Rampim et al. (2011) e Crusciol et al. (2016) também trazem resultados semelhantes onde a aplicação de gesso agrícola em áreas de plantio direto aumentou o teor de Mg^{2+} em camadas mais profundas do solo. Nas maiores profundidades, 165-185 e 225-245 cm, esse comportamento não foi encontrado indicando que os íons não foram carregados até essas profundidades. Ramos et al. (2019), em trabalho prévio na mesma área, verificaram que a maior espécie encontrada na profundidade de 225-245 cm foi Mg-COD, mostrando que com o passar do tempo o Mg^{2+} foi liberado do carbono orgânico ficando disponível na solução em sua forma livre.

Os percentuais iônicos encontrados para as espécies químicas de Mg na solução do solo, comparando as avaliações aos 16 meses (Ramos et al., 2019) e aos 76 meses (presente

estudo) após a aplicação do gesso estão apresentados na figura 3. Nas camadas iniciais até 45 cm de profundidade, as porcentagens do íon Mg livre aumentou na avaliação aos 76 meses, indicando a dissolução do par iônico MgSO_4 que tinha se formado na solução na avaliação aos 16 meses.

Figura 3 – Espécies químicas do Mg^{2+} em profundidade, comparando duas avaliações.



Legenda: Espécies químicas do Mg^{2+} em profundidade, comparando duas avaliações.

* Dados da avaliação realizadas aos 16 meses adaptados de Ramos et al (2019). Aos 16 meses não foi avaliado o tratamento G-14.

Fonte: Do autor (2021).

Na camada de 75 a 85 cm de profundidade no tratamento G-0 a porcentagem iônica de Mg^{2+} livre aumentou com o tempo de avaliação, porém nos tratamentos com maiores doses de gesso G-7 e G-56 o valor diminuiu, sendo que na primeira avaliação o valor de Mg-COD foi

maior, com o passar do tempo na segunda avaliação o par iônico $MgSO_4$ foi encontrado em maiores porcentagens.

Na camada mais profunda, de 225 a 245 cm, na avaliação realizada aos 16 meses após a aplicação do gesso, o Mg foi encontrado em quase sua totalidade na forma de Mg-DOC, sendo que na segunda avaliação foi quase totalmente encontrado na forma livre na solução. Resultados que indicam que houve um maior carreamento do Mg ao longo do perfil com o passar do tempo. Resultados que corroboram com trabalhos avaliados em maiores espaços de tempo como Rampim et al. (2011), onde avaliando aos 6 e 12 meses após a aplicação do gesso aumentou o teor do Mg em maiores profundidades, e Ramos et al. (2019), onde foi avaliado 16 meses após a aplicação.

Os resultados médios para o cátion Ca, e suas respectivas espécies químicas estão apresentados na tabela 3. As médias encontradas em todos os tratamentos foram 86,73, 9,25, 3,50 e 0,51% para Ca^{2+} , $CaSO_4^0$, Ca-COD e outras, respectivamente. No geral em todos os tratamentos, as maiores proporções do cálcio encontrado foram na forma livre Ca^{2+} , corroborando com os resultados de Ramos et al. (2019), realizados previamente na mesma área, indicando que não houve muita diferença na forma química de Ca^{2+} presente na solução do solo em relação ao tempo de aplicação. Entretanto, ressalta-se que nos trabalhos de Ramos et al. (2013) e Ramos et al. (2019), o Ca^{2+} não foi encontrado na camada de 225-245m, indicando que ocorreu um maior carreamento do Ca^{2+} para camadas mais profundas ao longo do tempo.

Tabela 3. Teores médios de Ca^{2+} na solução do solo e suas respectivas espécies químicas nas diferentes profundidades avaliadas.

Prof. (m)	Tratamentos	Ca ²⁺	Ca ²⁺	CaSO ₄ ⁰	Ca-COD	Outras (*)
		mg dm ⁻³	-----Espécies (%) -----			
15-25	G-0	11,58 c	88,93	0,18	10,5	0,39
	G-7	44,47 c	85,50	8,92	5,20	0,38
	G-14	186,22 b	92,07	6,32	1,50	0,11
	G-56	1165,25 a	58,72	40,91	0,35	0,02
35-45	G-0	17,13 c	91,00	0,66	7,99	0,35
	G-7	30,69 c	77,67	16,89	5,23	0,21
	G-14	239,60 b	89,36	9,65	0,88	0,11

	G-56	1129,01 a	58,43	41,14	0,32	0,11
75-85	G-0	25,24 b	94,89	0,89	3,66	0,56
	G-7	98,98 b	83,35	15,23	0,58	0,84
	G-14	331,13 a	87,57	11,43	0,80	0,20
	G-56	401,70 a	57,01	42,23	0,54	0,22
125-135	G-0	56,34 c	97,22	0,07	2,00	0,71
	G-7	147,72 bc	96,58	1,21	1,08	1,13
	G-14	220,56 b	99,24	0,18	0,57	0,01
	G-56	428,68 a	75,99	23,15	0,46	0,40
165-185	G-0	39,61 b	96,60	0,08	2,27	1,05
	G-7	64,45 b	96,60	0,08	2,27	1,05
	G-14	52,23 b	97,98	0	1,99	0,03
	G-56	306,63 a	95,78	2,20	0,43	1,59
225-245	G-0	0,74 ^{ns}	84,60	0,05	15,12	0,23
	G-7	3,49 ^{ns}	96,22	0,48	2,54	0,76
	G-14	2,87 ^{ns}	83,27	0,01	16,64	0,08
	G-56	90,43 ^{ns}	96,97	0,10	1,21	1,72
Valores médios			86,73	9,25	3,50	0,51

Letras iguais na mesma coluna, em cada profundidade avaliada, não diferenciam entre si pelo teste de médias SNK ($p \leq 0.05$). (*) Outras formas encontradas foram CaNO_3^+ , CaF^+ e CaCl^+ . (ns) Diferença não significativa a 5% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2021)

Nas profundidades 15-25, 35-45 e 75-85 cm no tratamento G-56, cerca de 40% do cálcio encontrado está na forma ligado ao sulfato, o que ocorreu devido ao grande fornecimento de sulfato de cálcio pelo gesso agrícola (ZOCA; PEN, 2017).

No tratamento G-0 nas camadas 15-25, 35-45 e 75-85 cm, os valores de Ca-COD foram 10,5, 7,99, 3,66%, porcentagens foram superiores em relação as demais devido a menor quantidade de cálcio aplicada no solo na forma de gesso agrícola. Apesar de estudos demonstrarem que a aplicação de gesso agrícola favorece o crescimento de raízes em maiores profundidades, aumentando assim a quantidade COD na solução do solo (COGO et al. 2020, NAVES et al. 2020, ZOCA; PEN 2017, TIECHER et al., 2019, JIANG et al. 2019, MARTINS et al. 2020), no presente estudo como a grande quantidade de Ca livre na solução fornecido pelas altas doses de gesso fez com que a porcentagem iônica do Ca-COD ficasse maior onde o teor de Ca é menor.

A partir da profundidade de 1,65m, a quantidade do par iônico CaSO_4^0 encontrada foi muito pequena, indicando a dissolução do gesso agrícola em Ca^{2+} e SO_4^{2-} (ZOCA; PEN, 2017) e o carreamento para as maiores profundidades aconteceu na forma livre e ligado ao carbono dissolvido na solução, mesmo nas maiores doses de gesso aplicadas.

Os resultados comparando as porcentagens das espécies químicas do cálcio encontradas na primeira avaliação aos 16 meses após aplicação dos tratamentos realizadas por Ramos et al. (2019), e aos 76 meses estão apresentados na figura 4. Nas duas avaliações e em todas as profundidades, o Ca^{2+} livre foi a espécie dominante, seguida pelo CaSO_4^0 . Em todas as camadas avaliadas, a proporção de Ca livre aumentou um pouco em relação a avaliação realizada aos 16 meses (RAMOS, et al 2019), indicando que há necessidade de tempo para a maior dissolução do gesso agrícola, o que concorda com outros estudos que avaliam a aplicação de gesso em longo prazo (ANDERSON et al. 2020, CRUSCIOL et al. 2016).

Figura 4 – Espécies químicas do Ca^{2+} em profundidade, comparando duas avaliações.

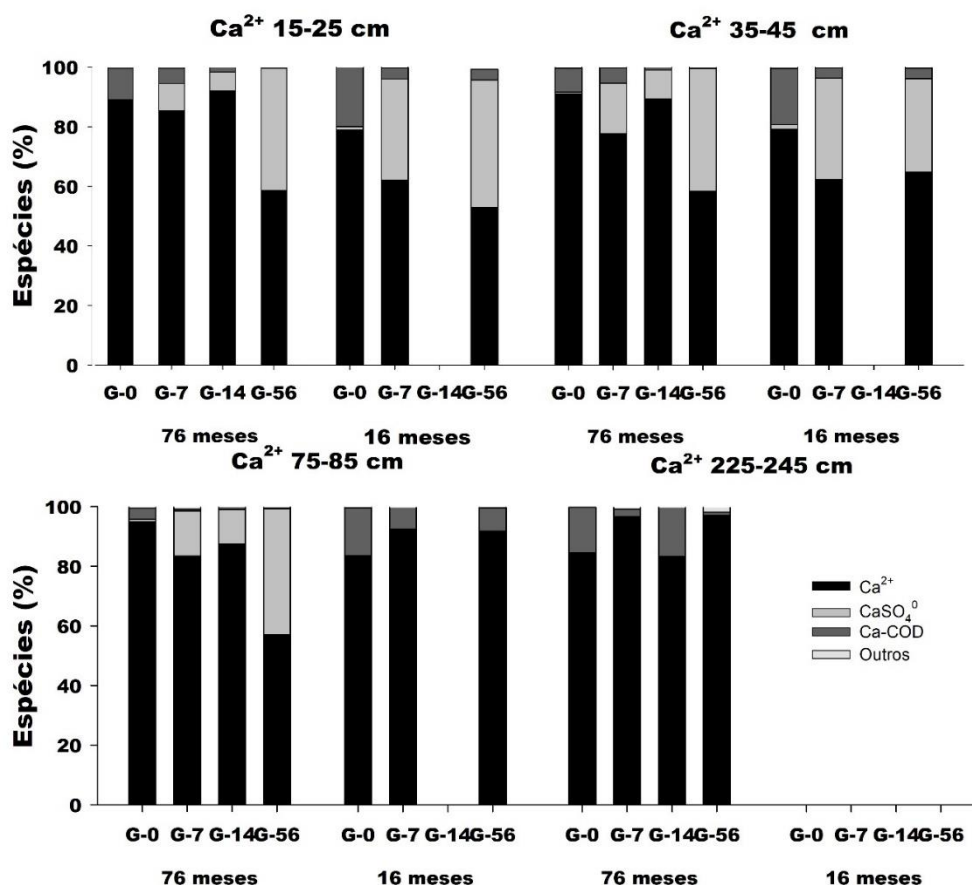


Figura 4: Espécies químicas do Ca^{2+} em profundidade, comparando duas avaliações.

* Dados da avaliação realizadas aos 16 meses adaptados de Ramos et al (2019). Aos 16 meses não foi avaliado o tratamento G-14.

Fonte: Do autor (2021).

Segundo Bhattacharjee et al. (2020), a solubilidade do gesso agrícola está em torno de $2,5\text{g L}^{-1}$, que também pode ser afetada pelas reações com outros íons presentes no solo. Essa baixa solubilidade indica a alta necessidade de água para que a reação de dissolução ocorra.

Os teores médios de potássio e suas respectivas espécies químicas estão apresentados na tabela 4. O potássio em quase sua totalidade foi encontrado na forma livre K^+ em todos os tratamentos e profundidades avaliados, corroborando com os resultados encontrados por Ramos et al. (2019). Considerando que o gesso agrícola não é fonte de K^+ (ZOCA; PENN 2017), este se encontra predominantemente na forma livre devido o deslocamento/liberação da fase sólida do solo causado pelo Ca^{2+} que é aplicado junto com o gesso e possui maior preferência para se ligar a fase sólida (RAMOS et al., 2019, CRUSCIOL et al., 2016).

Tabela 4. Teores médios de potássio na solução do solo e suas respectivas espécies químicas nas diferentes profundidades avaliadas.

Prof. (cm)	Tratamentos	K^+ mg dm ⁻³	-----Espécies (%)-----			Outras (1)
			K^+	KSO_4^0	K-COD	
15-25	G-0	44,18 c	99,89	-	-	0,11
	G-7	57,46 b	99,44	0,45	-	0,11
	G-14	39,63 c	99,64	0,33	-	0,03
	G-56	78,38 a	94,74	5,25	-	0,01
35-45	G-0	11,87 d	99,89	0,03	-	0,08
	G-7	43,24 b	98,98	0,95	-	0,07
	G-14	29,25 c	99,42	0,55	-	0,03
	G-56	136,58 a	94,77	5,21	-	0,02
75-85	G-0	3,44 a	99,82	0,04	-	0,14
	G-7	9,69 a	98,87	0,89	-	0,24
	G-14	2,51 a	99,25	0,71	-	0,04
	G-56	13,20 a	95,24	4,71	-	0,05
125-135	G-0	0,58 ^{ns}	99,82	-	-	0,18
	G-7	0,93 ^{ns}	99,64	0,06	-	0,3
	G-14	0,40 ^{ns}	99,99	-	-	0,01

	G-56	1,54 ^{ns}	98,08	1,81	-	0,11
165-185	G-0	0,70 ^{ns}	99,72	-	-	0,28
	G-7	0,80 ^{ns}	99,72	-	-	0,28
	G-14	0,58 ^{ns}	99,99	-	-	0,01
	G-56	1,69 ^{ns}	99,42	0,13	-	0,45
225-245	G-0	0,22 ^{ns}	99,94	-	-	0,06
	G-7	0,68 ^{ns}	99,79	0,02	-	0,19
	G-14	0,72 ^{ns}	99,98	-	-	0,02
	G-56	1,49 ^{ns}	99,54	-	-	0,46
Valores médios			98,98	1,41	-	0,13

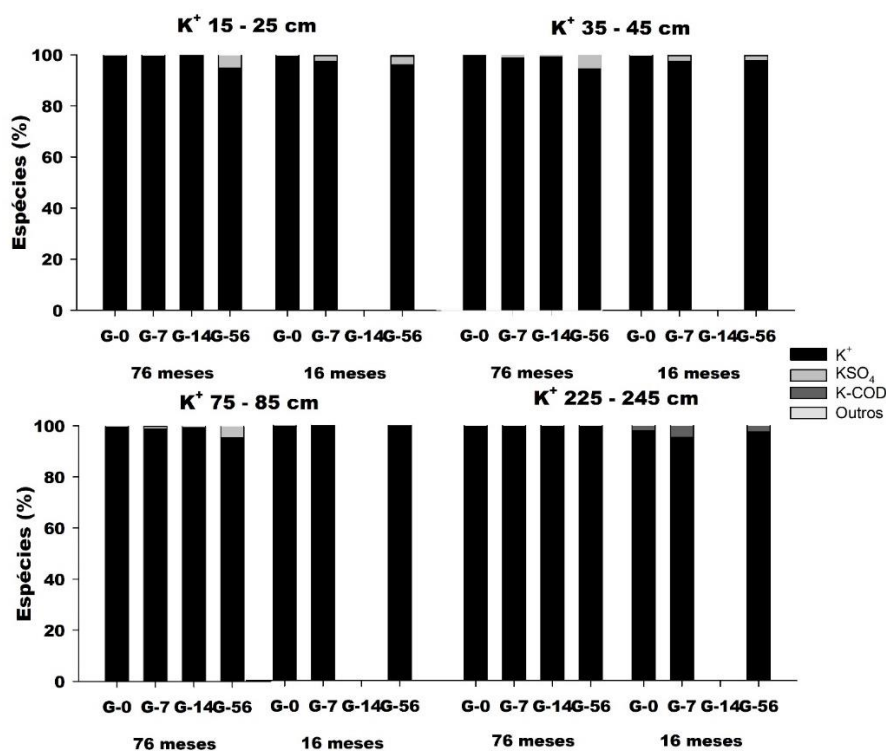
Letras iguais na mesma coluna, em cada profundidade avaliada, não diferenciam entre si pelo teste de médias SNK ($p \leq 0.05$). (*) Outras formas encontradas foram KNO_3 e KCl . (ns) Diferença não significativa a 5% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2021).

Nas profundidades de 15-25, 35-45 e 75-85 cm, para o tratamento com a maior dose de gesso aplicado (G-56), foram encontrados respectivamente, 5,25, 5,21 e 4,71% na forma da espécie iônica K_2SO_4^0 . Percentuais iônicos demonstram que onde foi aplicada a maior quantidade de sulfato ocorreu a ligação com o potássio livre na solução corroborando com resultados encontrados por Ramos et al. (2019) e Ramos et al. (2013). Porém demonstram que não foi o suficiente para ocorrer a lixiviação para camadas mais profundas do solo.

Os resultados das espécies químicas encontradas na solução do solo comparando as duas avaliações para o cátion K^+ estão apresentados na figura 5. Nas duas avaliações realizadas em todos os tratamentos e profundidades, o K^+ esteve presente na solução do solo, em sua quase totalidade, na forma livre, indicando baixa formação do par iônico K_2SO_4 .

Figura 5 – Espécies químicas do Ca^{2+} em profundidade, comparando duas avaliações.



Legenda: Espécies químicas do K^+ em profundidade, comparando duas avaliações. * Dados da avaliação realizadas aos 16 meses adaptados de Ramos et al (2019). Aos 16 meses não foi avaliado o tratamento G-14.

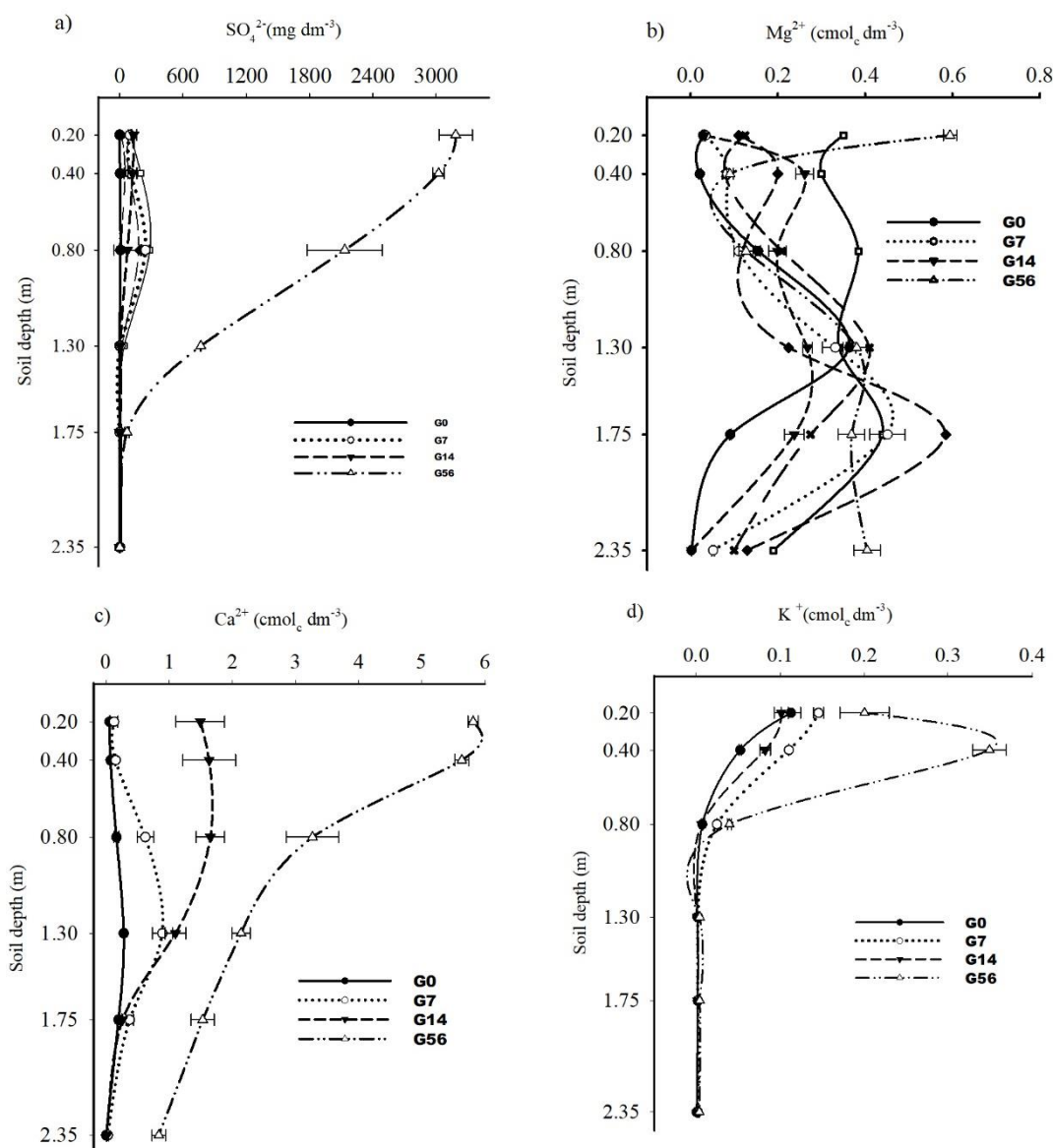
Fonte: Do autor (2021)

O carreamento do K^+ na solução do solo acontece proporcionalmente ao teor de K^+ presente no solo (RAMOS, et al. 2013). O sulfato apresenta na solução maior afinidade de formação de pares iônicos com o Ca^{2+} e Mg^{2+} (RAMOS, et al. 2019, BOSSOLANI, et al. 2020). Porém como apresentado nos resultados na camada inicial na dose 56 t ha^{-1} nas duas avaliações ocorreu uma maior formação do par iônico K_2SO_4 devido a grande quantidade de sulfato disponível na solução, oriundo da dissolução do gesso agrícola. Resultado parecido apareceu na avaliação aos 76 meses na camada de 75-85 cm indicando o efeito do tempo nessa formação do par iônico, já que na avaliação anterior 100% do K^+ estava livre na solução do solo.

Os resultados encontrados na camada de 225-245 na avaliação aos 76 meses após a aplicação de gesso que todo o K^+ estava livre na solução do solo, conforme já relatado, ao passo que, na avaliação realizada aos 16 meses após a aplicação de gesso, baixo percentual de K^+ se apresentou ligado ao carbono orgânico na solução. Tal fato indica que parte das formas de K foi liberada das formas orgânicas com o passar do tempo (RAMOS, et al. 2019).

O comportamento das bases juntamente com o sulfato em todo o perfil do solo está apresentado na figura 6 (teores absolutos dos íons encontrados na solução do solo). Pode-se notar por esta figura que com o aumento da dose de gesso aplicada, principalmente na dose 56 t ha⁻¹, os teores de Ca e sulfato aumentaram no perfil até uma profundidade de cerca de 2 metros. O comportamento do Mg foi muito variável, apresentando tendência de lixiviação principalmente na profundidade de 245 cm na maior dose aplicada. Por fim, para o K, houve um aumento maior apenas na camada de 20-40 comparada com a superfície na dose 56 t ha⁻¹.

Figura – 6: Teores de bases e sulfato ao longo do perfil 76 meses após a aplicação de gesso agrícola. Adaptado de Ferraz (2017).



Legenda: Teores de bases e sulfato ao longo do perfil 76 meses após a aplicação de gesso agrícola. Fonte: Adaptado de Ferraz (2017). (*) Barras horizontais referem-se ao erro padrão da média. Fonte: Do autor (2021).

4 CONCLUSÃO

A especiação química da solução do solo indicou que as bases Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ e o anión SO_4^{2-} se encontram predominantemente em formas livres na solução do solo. Os percentuais das formas livres encontradas na solução do solo aumentaram com o tempo, ou seja, os porcentuais dessas espécies foram maiores na avaliação realizada no presente estudo

(76 meses após a aplicação de gesso) do que na avaliação feita aos 16 meses após a aplicação do gesso.

O Mg^{2+} foi lixiviado para as camadas mais profundas em sua forma livre e na formação do par iônico $MgSO_4$. Nos tratamentos com maiores doses de gesso aplicados, o mesmo ainda não dissolveu completamente aos 76 meses após a aplicação. A formação do par iônico K_2SO_4 foi mínima, sendo que o cátion K foi encontrado para todas as doses e profundidade, em quase sua totalidade, na forma livre de K^+ .

REFERÊNCIAS

ANDERSON, G.C.; PATHAN, S.; EASTON, J.; HALL, D.J.M.; SHARMA, R. Short- and Long-Term Effects of Lime and Gypsum Applications on Acid Soils in a Water-Limited Environment: 2. **Soil Chemical Properties**. *Agronomy* v. 10, 2020.

ABDOLLAHPOUR, M.; RAHNEMAIE, R.; LÜTZENKIRCHEN, J. The vulnerability of calcareous soils exposed to Mg-enriched irrigation water Land. **Degradation and Development** 2020.

BHATTACHARJEE, S.; KUMAR, R.; HINDORYA, P S.; DUTTA, S. Gypsum in agriculture: a brief discussion. *Agriallis*.V 2, 7 2582-368, 2020.

BOSSOLANI, J. W; CRUSCIOL, C. A. C; MERLOTI. Long-term lime and gypsum amendment increase nitrogen fixation and decrease nitrification and denitrification gene abundances in the rhizosphere and soil in a tropical no-till intercropping system. **Geoderma, Amsterdam, Elsevier**, v. 375, p. 1-12, 2020.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileiro – grãos: Nono levantamento, junho 2013 – safra 2019/2020: Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. 2020. **Disponível em:** <<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS>>. Acesso em: 26 dez. 2021.

COGO, F D.; JUNIOR, O J S.; GUIMARAES, P T G.; SIQUIERA, J O.; CARNEIRO, M A C. High rates of agricultural gypsum affect the arbuscular mycorrhiza fungal community and coffee yield. **Bragantia**, Campinas, v. 79, n. 4, p.487-497, 2020.

CRUSCIOL, C.A.C. et al. Soil fertility plant nutrition and grain yield of upland rice affected by surface application of lime silicate and phosphogypsum in a tropical no-till system. **Catena**, 137(1): 87–99, 2016.

JIANG, et al. 2019. Molecular speciation of phosphorus in phosphogypsum waste by solid-state nuclear magnetic resonance spectroscopy. **Science of the Total Environment** 133958, 2019.

- ESSINGTON, M. Soil and Water Chemistry – An Integrative Approach CRC Press, 2004.
- FERRAZ, RAUL MAGALHÃES. **Efeitos a longo prazo da aplicação de altas doses de gesso nas características químicas em perfil de latossolo cultivado com café. (2017).** 50p Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2017.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e agrotecnologia**, v. 38, p. 109-112, 2014.
- GUSTAFSSON, J. P. Visual MINTEQ ver. 3.1. **Department of Land and Water Resources Engineering, KTH (Royal Institute of Technology)**, SE-100 44, Stockholm, Sweden. www2.lwr.kth.se/English/OurSoftware/vminteq/index.htm, 2012.
- LOPES AS; GUILHERME LRG. Career Perspective on Soil Management in the Cerrado **Region of Brazil. Advances in Agronomy**, v.35, p. 1-72, 2016.
- MACANA, Y A M.; TOLEDO, F H S F. FERRAZ, A V.; GONCALVES, J L M.; LOPEZ, S M D.; CUBILLOS, C A B.; ROJAS, A N S.; BOLOGNANI, H A. Soil fertility and fine root distribution after gypsum application in Eucalyptus plantations with different tolerance to water deficit. **New Forests**, 51:1039–1054, 2020.
- MARTINS, A.P. et al. 2020. Nine-year impact of grazing management on soil acidity and aluminum speciation and fractionation in a long-term no-till integrated crop-livestock system in the subtropics. **Geoderma**. 359, 113986, 2020.
- MATIELLO, J.B., SANTINATO, R., GARCIA, A.W.R., ALMEIDA, S.R., FERNANDES, D.R. Cultura de Café no Brasil: Novo Manual de Recomendações. **MAPA/PROCAFÉ**, Rio de Janeiro, 2016.
- NAVES, A. DE P.; SILVA, A. O.; BARBOSA, M. V.; PINTO, F. A.; SANTOS, J. V. DOS.; SAGGIN JUNIOR, O. J.; GUIMARÃES, P. T. G.; CARNEIRO, M. A. C. Behavior of the biochemical attributes of a Oxisol submitted to high doses of gypsum in the coffee culture. **Coffee Science** - ISSN 1984-3909, v. 15, p. e151756, 2020.
- RAMOS, B.Z, et al. Doses de gesso em cafeeiro: influência nos teores de cálcio, magnésio, potássio e pH na solução de um Latossolo vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 37(4): 1018-1026, 2013.
- RAMOS, B.Z. et al. Ionic speciation in a dystrophic red latosol under coffee crop and high doses of gypsum. **Coffee Science**, 14(3): 281-290, 2019.
- RAMPIM, L. et al. Atributos químicos de solo e resposta do trigo e da soja ao gesso em sistema semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1687-1698, 2011.

RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ, V.H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**, 289-302, 1999.

SERAFIM, M.E. et al. Sistema conservacionista e de manejo intensivo do solo no cultivo de cafeeiros na região do Alto São Francisco, MG: estudo de caso. **Bioscience Journal**, 27(6): 964-977, 2011.

SPERA, S. Agricultural intensification can preserve the Brazilian Cerrado: applying lessons from Mato Grosso and Goiás to Brazil's last agricultural frontier Trop. **Tropical Conservation Science**.2017.

TIECHER, T., L. G. D. O. DENARDIN, A. P. MARTINS, O. H. PIAS, L. R. NUNES, T. L. TIECHER, J. W. R. ALVAREZ, F. J. K. MALLMANN, G. BRUNETTO, AND D. O. D. RHEINHEIMER. Dynamics of sulfate and basic cations in soil solution as affected by gypsum fertilization in an Ultisol of Southern Brazil. **Archives of Agronomy and Soil Science** 65 (14):1998–2012, 2019.

ZAMBROSI, F.C.B.; ALLEONI, R.F.; CAIRES, E.F. Aplicação de gesso agrícola e especiação iônica da solução de um Latossolo sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, 37(1): 110-117, 2017.

ZOCA, S.M. PENN, C. An important tool with no instruction manual: a review of gypsum use in agriculture. *Advances in Agronomy*, 144(1):1-44, 2017.