



**FLÁVIO ARAÚJO DE MORAES**

**EFFECT OF LIMESTONE DOSES INCORPORATED AT 40  
CM ON THE AVAILABILITY OF NUTRIENTS, ROOT  
GROWTH, AND PRODUCTIVITY OF ANNUAL CROPS**

**LAVRAS – MG  
2024**

**FLÁVIO ARAÚJO DE MORAES**

**EFFECT OF LIMESTONE DOSES INCORPORATED AT 40 CM ON THE  
AVAILABILITY OF NUTRIENTS, ROOT GROWTH, AND PRODUCTIVITY OF  
ANNUAL CROPS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Silvino Guimarães Moreira  
Orientador

Prof. Dr. Guilherme Lopes  
Coorientador

**LAVRAS – MG  
2024**

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

Moraes, Flávio Araújo de.

Efeito de doses de calcário incorporadas a 40 cm na  
disponibilidade de nutrientes, no crescimento de raízes e na  
produtividade de culturas anuais / Flávio Araújo de Moraes. - 2023.

100p.:il.

Orientador: Silvino Guimarães Moreira.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Calagem incorporada. 2. Acidez do solo. 3. Disponibilidade  
de nutrientes. I. Moreira, Silvino Guimarães. II. Título.

**FLÁVIO ARAÚJO DE MORAES**

**EFFECT OF LIMESTONE DOSES INCORPORATED AT 40 CM ON THE  
AVAILABILITY OF NUTRIENTS, ROOT GROWTH, AND PRODUCTIVITY OF  
ANNUAL CROPS**

**EFEITO DE DOSES DE CALCÁRIO INCORPORADAS A 40 CM NA  
DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES, NO CRESCIMENTO DE RAÍZES E NA  
PRODUTIVIDADE DE CULTURAS ANUAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 28 de fevereiro de 2023.

Dra. Christiane Augusta Diniz Melo  
Dr. Fábio Aurélio Dias Martins  
Dr. Francisco Hélcio Canuto Amaral  
Dr. Márcio Renato Nunes

UFLA  
EPAMIG  
ReHAgro  
University of Florida

Prof. Dr. Silvino Guimarães Moreira  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2024**

*À minha família, mãe Conceição, pai Miguel e irmãos Ivan e Ivanize pelo apoio em todas as etapas da minha vida acadêmica*

**DEDICO.**

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, pela oportunidade.

À AMPAR pelo apoio financeiro, que foi fundamental para a execução do trabalho.

À fazenda Santa Helena, do grupo G7 Empreendimentos, Fazenda Ingaí e a Fazenda Múquem, em especial, aos produtores Evandro Ferreira e Luiz Otávio, pela disponibilização da área para a implantação do experimento. Ao João do Galo, por ter cedido o distribuidor de calcário. Sou muito grato a todos vocês.

Ao professor Silvino Guimarães Moreira, pela orientação, amizade, dedicação e paciência durante todo esse tempo de trabalho.

Aos professores, Bruno Montoani, Guilherme Lopes, Nilton Curi, pelo apoio no desenvolvimento do trabalho.

A todos do grupo G-MAP, pelos bons momentos vividos e todo o apoio na condução deste trabalho.

Ao setor de grandes culturas, em especial, Antônio, Edésio, Ezequiel e Manguin (*in memoriam*), por toda a ajuda.

À equipe do laboratório de Física do Solo, Doroteo e Dulce, que foram fundamentais para a realização das análises físicas.

Ao Laboratório 3RLAB, pela parceria na execução das análises.

Ao Francisco Élcio, pela colaboração nas análises de calcário.

Ao meu amigo Devison Peixoto, por toda a ajuda, no desenvolvimento deste trabalho, sua participação foi fundamental para a conclusão desta etapa.

Aos amigos que levo para a vida Celso Tuma, Junior Resende, Larissa Cocato, Daniel Paiva, Juliano Evaristo, Breno Araújo, Alessandro Alvarenga, Devison Peixoto, Crislene Vieira, Hugo Resende, Fabio Mesquita, Vinícius Vespoli, Luziane Ferreira, Júlia Macedo que próximos ou distantes fisicamente sempre contribuíram de alguma forma.

À toda minha família pelo apoio.

**MUITO OBRIGADO!**

## RESUMO

A acidez do solo é uma das grandes barreiras para o aumento de produtividade em condições tropicais, pois está diretamente associada a baixos teores de nutrientes. A utilização de calcário em doses adequadas é tida como a principal forma de melhorar a fertilidade do solo e a nutrição das plantas, mas ainda há dúvidas no campo sobre como definir as doses corretas de corretivos. Dessa forma, desenvolveu-se o presente estudo com o objetivo de avaliar os efeitos da incorporação de calcário de 0 a 40 cm, nos atributos químicos do solo, na disponibilidade de macro e micronutrientes, no desenvolvimento de raízes de milho segunda safra e na produtividade das culturas anuais. Para isso, foram implantados três experimentos, em diferentes locais (ano 2017), com cinco doses de calcário (0, 3, 6, 9, 12 e 15 Mg ha<sup>-1</sup>) incorporadas na camada 0-40 cm. Ao longo dos anos, foram cultivados soja, milho, feijão e trigo. As coletas de amostras de solo foram realizadas sempre ao final da safra primavera/verão e as de folha, no estágio de florescimento das culturas cultivadas na safra primavera/verão. A avaliação de raízes foi realizada, em 2020, na cultura do milho segunda safra, consorciada com *Brachiaria ruziziensis*, até 60 cm de profundidade. As doses acima de 9 Mg ha<sup>-1</sup> aumentaram de forma significativa os teores de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e os valores pH e de saturação por bases e, conseqüentemente, promoveram maior desenvolvimento do sistema radicular do milho consorciado com *Brachiaria ruziziensis* até 60 cm de profundidade. Houve correlação positiva entre pH e absorção de macronutrientes. Não foi observado efeito da calagem sobre o teor de Zn do solo. No entanto o Fe foi o nutriente que teve maior redução de disponibilidade no solo pela calagem. As concentrações de B, Fe, Mn e Zn, nas folhas de soja e feijão, reduziram com o aumento das doses de calcário, porém ficaram dentro dos níveis adequados. A produtividade relativa de 95% foi atingida, quando 80% e 52% da CTC potencial, nas camadas de 0 a 20 e 20 a 40 cm, respectivamente, estavam ocupadas com Ca + Mg, demonstrando a necessidade de se rever as atuais metodologias de se recomendar calcário. Por fim, a calagem incorporada, na camada de 0-40 cm, mostrou-se eficiente, para melhorar o ambiente radicular, permitindo que as culturas expressassem o seu potencial produtivo.

**Palavras-chave:** acidez do solo; micronutrientes; macronutrientes; calag. em profunda.

## ABSTRACT

Soil acidity is one of the greatest barriers to increasing productivity under tropical conditions since it is directly associated with low nutrient levels. The use of limestone in adequate doses is considered the primary way to improve soil fertility and plant nutrition. However, there are doubts about defining the correct doses of corrective agents. Thus, this study aimed to evaluate the effects of incorporating limestone at 0 to 40 cm on the chemical attributes of the soil, availability of macro and micronutrients, development of second-crop corn roots, and annual crop productivity. Three experiments were implemented in different locations (2017) using five doses of limestone (0, 3, 6, 9, 12, and 15 Mg ha<sup>-1</sup>) incorporated in the 0-40 cm layer. Soybeans, corn, beans, and wheat were cultivated over the years. Soil samples were always collected at the end of the spring/summer harvest, and leaf samples were collected at the flowering stage of the crops grown during the spring/summer harvest. The roots were evaluated in 2020, during the second harvest of corn crop intercropped with *Brachiaria ruziziensis* up to 60 cm deep. Doses above 9 Mg ha<sup>-1</sup> significantly increased the levels of Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, and pH and base saturation values, consequently promoting greater development of the root system of corn intercropped with *Brachiaria ruziziensis* up to 60 cm deep. There was a positive correlation between pH and macronutrient absorption. No effect of liming on soil Zn content was observed. However, Fe presented the most significant reduction in soil availability due to liming. The concentrations of B, Fe, Mn, and Zn in soybean and bean leaves were reduced with increasing lime doses. However, they remained within adequate levels. Relative productivity of 95% was achieved when 80% and 52% of the potential CEC in layers from 0 to 20 and 20 to 40 cm, respectively, were occupied with Ca + Mg, demonstrating the need to review current methodologies of limestone recommendations. Finally, the liming incorporated in the 0-40 cm layer improved the root environment, allowing crops to express their productive potential.

**Keywords:** soil acidity; micronutrients; macronutrients; deep liming.



## **INDICADORES DE IMPACTO SOCIAIS, TECNOLÓGICOS, ECONÔMICOS E CULTURAIS**

O calcário é fundamental para a agricultura, seu uso de forma correta garante um equilíbrio químico do solo, o que permite o aumento da produtividade das culturas. Culturas como soja, milho, feijão e trigo, que são fundamentais para a economia do país, aumentaram a produtividade ao longo dos 4 anos de estudo, mostrando que é possível produzir mais alimentos em uma mesma área. Quando se compara a média de produtividade de soja no país com as médias obtidas no trabalho, é possível observar um incremento de produtividade variando de 22 a 67 % ao longo de 4 safras. O Brasil apresenta grande quantidade de pastagens degradadas e com baixo potencial produtivo. Aplicando as técnicas sugeridas neste trabalho, será possível aumentar a produção de alimentos e conseqüentemente reduzir a fome e a exploração de novas áreas, uma vez que é possível verticalizar a produção. Com maior produtividade se obtém maior rentabilidade e com isso haverá novos investimentos no negócio, gerando oportunidades de novos empregos. A conservação do solo é outro ponto importante, com o aumento da produtividade as plantas apresentam maior produção de matéria seca de parte aérea e raízes, com isso impactam diretamente no aumento da matéria orgânica do solo. Com o aumento da matéria orgânica do solo a água infiltra melhor no solo, reduzindo problemas de erosão e perda de água. Outro ponto importante é a capacidade da matéria orgânica de capturar e armazenar carbono, ajudando a remover o dióxido de carbono da atmosfera e contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Este processo é vital para o equilíbrio do carbono na biosfera e na regulação do clima global.

## **SOCIAL, TECHNOLOGICAL, ECONOMIC AND CULTURAL IMPACTS**

Limestone is essential for agriculture; its correct use ensures a chemical balance in the soil, allowing for increased crop productivity. Crops such as soybeans, corn, beans, and wheat, which are crucial to the country's economy, have seen increased productivity over the four years of study, demonstrating that it is possible to produce more food in the same area. When comparing the average soybean productivity in the country with the averages obtained in the study, an increase in productivity ranging from 22 to 67% over four harvests can be observed. Brazil has a large amount of degraded pastures with low productive potential. By applying the techniques suggested in this study, it will be possible to increase food production and consequently reduce hunger and the exploitation of new areas, as it is possible to intensify production. Higher productivity leads to higher profitability, which will result in new investments in the business, generating opportunities for new jobs. Soil conservation is another important aspect; with increased productivity, plants produce more dry matter in both above-ground and root parts, thus directly impacting the increase in soil organic matter. With the increase in soil organic matter, water infiltrates better into the soil, reducing erosion problems and water loss. Another important aspect is the ability of organic matter to capture and store carbon, helping to remove carbon dioxide from the atmosphere and contributing to mitigating climate change. This process is vital for carbon balance in the biosphere and for regulating global climate.

## LISTA DE FIGURAS

### SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

#### ARTIGO 1

- Fig. 1. Details of the three sites where the experiments were conducted over three years. ....21
- Fig. 2. Rainfall distribution and average temperature during the three years of the study.....22
- Fig. 3. Exchangeable  $\text{Ca}^{2+}$  by soil layer, site (Local1, Local2, and Local3) and cropping season (2017/2018, 2018/2019, and 2019/2020) as a function of lime rates incorporated in the 0-40 cm layer. ....29
- Fig. 4. Exchangeable  $\text{Mg}^{2+}$  by soil layer, site (Local1, Local2, and Local3) and cropping season (2017/2018, 2018/2019, and 2019/2020) as a function of lime rates incorporated in the 0-40 cm layer. ....30
- Fig. 5. Soil pH by soil layer, site (Local1, Local2, and Local3) and cropping season (2017/2018, 2018/2019, and 2019/2020) as a function of lime rates incorporated in the 0-40 cm layer.....31
- Fig. 6. Soil base saturation by layer, site (Local1, Local2, and Local3) and crop season (2017/2018, 2018/2019, and 2019/2020) as a function of lime rate incorporated in the 0-40 cm layer.....33
- Fig. 7. Maize + brachiaria root distribution in the soil profile as a function of lime rates (1 = 0  $\text{Mg ha}^{-1}$ ; 2 = 3  $\text{Mg ha}^{-1}$ ; 3 = 6  $\text{Mg ha}^{-1}$ ; 4 = 9  $\text{Mg ha}^{-1}$ ; 5 = 12  $\text{Mg ha}^{-1}$ ; 6 = 15  $\text{Mg ha}^{-1}$ ) incorporated into the 0-40 cm depth.....34
- Fig. 8. Length ( $\text{mm cm}^{-2}$ ), surface area ( $\text{mm}^2 \text{cm}^{-2}$ ), and volume ( $\text{mm}^3 \text{cm}^{-2}$ ) of roots of maize + brachiaria by soil layer as a function of the lime rates incorporated in the 0-40 cm layer.....35
- Fig. 9. Relationships between maize yield during the 2020 second season and root length, surface area, and volume of maize + brachiaria at depths of 0-20, 20-40, and 40-60 cm. ....36
- Fig. 10. Soybean, maize, common bean, and wheat yield as a function of the lime rate incorporated in the 0-40 cm layer in three sites (Local1, Local2, and Local3). ....38
- Fig. 11. Maize plants intercropped with Brachiaria as a function of limestone doses around 60 days after sowing. (1 = control; 2 = 6  $\text{Mg ha}^{-1}$ ; 3 = 12  $\text{Mg ha}^{-1}$ ). ....40

## ARTIGO 2

Figura 1 - Localização das áreas onde foram conduzidos os experimentos.....	50
Figura 2 - Distribuição de chuva e temperatura média durante os três anos do estudo.....	51
Figura 3 - Produtividade acumulada de grãos, durante três cultivos de primavera/verão, em três locais, em função de doses de calcário incorporadas 0-0,40 m. ....	62
Figura 4 - Correlação de Pearson entre a produtividade dos cultivos, pH e micronutrientes do solo, e concentração foliar de macro e micronutrientes no Local1 (a), Local2 (b) e Local3 (c).....	62

## ARTIGO 3

Figura 1 - Localização das áreas onde foram conduzidos os experimentos.....	80
Figura 2 - Distribuição de chuva e temperatura média durante os três anos do estudo.....	81
Figura 3 - Valores de pH (H <sub>2</sub> O) no solo nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm em função das doses de calcário incorporadas na camada de 0-40 cm em dois locais (Local 1 e 2) durante a safra 2020/2021 .....	88
Figura 4 - Participação de Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> na CTC pH 7,0 (%) dos solos nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, em função das doses de calcário incorporadas na camada de 0-40 cm em dois locais (Local 1 e 2), durante a safra 2020/2021 .....	90
Figura 5 - Produtividade relativa de seis cultivos em dois locais (Local 1 e 2) em função das doses calcário incorporadas na camada de 0-40 cm.....	91
Figura 6 - Produtividade relativa, em função da das participações de Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup> na CTC pH 7,0, nas profundidades de 0-20 e de 20 - 40 cm. ....	93
Figura 7 - Produtividade relativa, em função das participações de Ca <sup>2+</sup> na CTC pH 7,0, nas profundidades de 0-20 e de 20 - 40 cm. ....	94
Figura 8 - Produtividade relativa, em função das participações de Mg <sup>2+</sup> na CTC pH 7,0, nas profundidades de 0-20 e de 20 - 40 cm .....	94

## LISTA DE TABELAS

### SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

#### ARTIGO 1

Table 1. Soil chemical properties by site and depth before the beginning of the study.....	23
Table 2 Sand, silt, and clay contents and texture of the soil by site and depth. ....	23
Table 3. Crops and fertilization history within the three experimental sites.....	26

#### ARTIGO 2

Tabela 1 - Conteúdos de areia, silte e argila e textura do solo por local e profundidade.....	52
Tabela 2 - Propriedades químicas do solo por local e profundidade antes do início do estudo.....	53
Tabela 3 - Histórico das culturas, com cultivar, população, datas de realização das operações de semeadura, colheita e adubações nos três locais.....	55
Tabela 4 - Teores de micronutrientes no solo nos três locais, em função de doses de calcário incorporadas a 0,40 m de profundidade.....	59
Tabela 5 - Concentrações foliares de micronutrientes em soja e feijão, em diferentes locais, em função de doses de calcário incorporadas a 0,40 m de profundidade.....	60
Tabela 6 - Concentrações foliares de macronutrientes em soja e feijão, em diferentes locais, em função de doses de calcário incorporadas a 0,40 m de profundidade.....	61

#### ARTIGO 3

Tabela 1 - Conteúdos de areia, silte e argila e textura do solo por local e profundidade.....	81
Tabela 2 - Propriedades químicas do solo por local e profundidade antes do início do estudo.....	82
Tabela 3 - Histórico de culturas e adubação nos três locais.....	84

## SUMÁRIO

	<b>PRIMEIRA PARTE</b> .....	<b>14</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>16</b>
	<b>SEGUNDA PARTE - ARTIGOS</b> .....	<b>18</b>
	<b>ARTIGO 1 - LIME INCORPORATION UP TO 40 CM DEEP INCREASES ROOT GROWTH AND CROP YIELD IN HIGHLY WEATHERED TROPICAL SOILS</b> .....	<b>18</b>
	<b>ARTIGO 2 - EFEITO DE DOSES DE CALCÁRIO INCORPORADAS A 40 CM NA DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES E NA PRODUTIVIDADE DE CULTURAS ANUAIS</b> .....	<b>46</b>
	<b>ARTIGO 3 - RELAÇÃO ENTRE DOSES DE CALCÁRIO INCORPORADAS A 40 CM, PARTICIPAÇÃO DE CÁLCIO E MAGNÉSIO NA CTC DO SOLO E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS</b> .....	<b>76</b>

## PRIMEIRA PARTE

### 1 INTRODUÇÃO

A agricultura brasileira vem evoluindo ano a ano, em diversos setores, com notável incremento nas produtividades das culturas. No entanto há uma grande possibilidade de aumentar a produção de alimentos no país, explorando áreas que estão em um processo avançado de degradação. De acordo com Dias Filho (2011), estima-se que dos 170 milhões de hectares de pastagens no Brasil, aproximadamente, 120 milhões estão com certo grau de degradação. Áreas degradadas, em geral, apresentam baixos teores de nutrientes e elevada acidez do solo, o que prejudica o desenvolvimento das culturas (Fageria; Baligar, 2008; Lopes; Guilherme, 2016).

O primeiro passo, para tornar essas áreas produtivas, é a correção da acidez do solo, que é o principal fator limitador para se atingir altas produtividade (Fageria; Baligar 2008; Lopes; Guilherme, 2016). A calagem já é estudada há décadas, sendo a primeira prática para iniciar a construção da fertilidade dos solos ácidos e pobres em nutrientes, pois promove aumentos dos teores de Ca e Mg, redução da acidez e melhoria na eficiência no uso de fertilizantes. Diversos trabalhos apontam a importância da calagem como ferramenta, para aumentar a resiliência das culturas aos déficits hídricos, pois proporciona às plantas maior desenvolvimento do sistema radicular (Alvarez; Ribeiro, 1999; Doss; Dumas; Lund, 1979; Gonzalez-Erico *et al.*, 1979; Ho *et al.*, 2005; Lilley; Kirkegaard, 2011; Lynch, 2007; Moraes *et al.*, 2023; Rajj, 2011; Rajj *et al.*, 1996; Wasson *et al.*, 2012).

A importância da calagem fica clara diante dos diversos trabalhos que são publicados tratando deste assunto. No entanto, ainda, há vários questionamentos sobre a dose correta, a profundidade de incorporação do corretivo, bem com os teores adequados de nutrientes que devem ser atingidos no solo. Além disso, a agricultura evoluiu e anualmente são lançados novos cultivares com alto potencial produtivo, mas supostamente com maior demanda de solos mais bem corrigidos e com teores adequados de nutrientes.

Anualmente quase 2,0 milhões de hectares são transformados, em novas áreas de produção no Brasil, sendo boa parte dessas áreas anteriormente ocupadas por pastagens degradadas. Muitas dessas áreas passam a ser cultivadas sob o sistema de plantio direto (SPD), que tem como uma das suas premissas o não revolvimento do solo após sua instalação. No entanto, para que seja possível cumprir essa condição de não revolvimento, a correção inicial do solo deve ser feita de maneira precisa, pois verifica-se que a movimentação do calcário

aplicado na superfície, para as camadas inferiores, é demorada (Caires, 2013; Resende, 2021). Estudos de mais de 40 anos demonstram a importância da correção da acidez do solo, em profundidade e elevação dos teores de Ca e Mg no perfil, a fim de garantir incremento do crescimento radicular e da produtividade dos cultivos, além de aumentar a tolerância das plantas à escassez hídrica e usufruir dos benefícios do SPD (Doss; Dumas; Lund, 1979; Gonzalez-Erico *et al.*, 1979). Diante desses fatos, a hipótese geral do presente estudo é que a incorporação de calcário até 40 cm aumenta o crescimento de raízes das plantas em profundidade, aumentando a resiliência das plantas aos déficits hídricos, além de aumentar a produtividade das culturas. Assim, desenvolveu-se o presente estudo com os objetivos de avaliar os efeitos da incorporação de calcário de 0 a 40 cm, nos atributos químicos do solo, na disponibilidade de macro e micronutrientes, no desenvolvimento de raízes de milho de segunda safra e na produtividade das culturas anuais



## REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, V. V. H.; RIBEIRO, A. C. Calagem. *In*: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 43-60.
- CAIRES, E. F. Correção da acidez do solo em sistema plantio direto. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 141, p. 1-13, mar. 2013.
- DIAS FILHO, M. B. **Degradação de pastagens: processos, causas e estratégias de recuperação**. 4. ed. Belém: Embrapa, 2011.
- DOSS, B. D.; DUMAS, W. T.; LUND, Z. F. Depth of lime incorporation for correction of subsoil acidity 1. **Agronomy Journal**, Madison, v. 71, n. 4, p. 541-544, July/Aug. 1979. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj1979.00021962007100040005x>.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Ameliorating soil acidity of tropical oxisols by liming for sustainable crop production. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 99, p. 345-399, 2008. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)00407-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)00407-0).
- GONZALEZ-ERICO, E. *et al.* Effect of depth of lime incorporation on the growth of corn on an oxisol of Central Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Fayetteville, v. 43, n. 6, p. 1155-1158, Nov./Dec. 1979. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1979.03615995004300060019x>.
- HO, M. D. *et al.* Root architectural tradeoffs for water and phosphorus acquisition. **Functional Plant Biology**, Victoria, v. 32, p. 737-748, 2005.
- LILLEY, J. M.; KIRKEGAARD, J. A. Benefits of increased soil exploration by wheat roots. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 122, n. 2, p. 118-130, May 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.03.010>.
- LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. A career perspective on soil management in the cerrado region of Brazil. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 137, p. 1-72, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.12.004>.
- LYNCH, J. P. Roots of the second green revolution. **Australian Journal of Botany**, Melbourne, v. 55, p. 493-512, 2007.
- MORAES, F. A. *et al.* Lime incorporation up to 40 cm deep increases root growth and crop yield in highly weathered tropical soils. **European Journal of Agronomy**, London, v. 144, p. 126763, Mar. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126763>.
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011.
- RAIJ, B. van *et al.* **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1996.

RESENDE, H. C. D. **Calagem para manutenção da correção da acidez em solos sob plantio direto**. 2021. 87 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2021.

WASSON, A. P. *et al.* Traits and selection strategies to improve root systems and water uptake in water-limited wheat crops. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 63, n. 9, p. 3485-3498, May 2012. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/ers111>.

**SEGUNDA PARTE - ARTIGOS****ARTIGO 1 - LIME INCORPORATION UP TO 40 CM DEEP INCREASES ROOT GROWTH AND CROP YIELD IN HIGHLY WEATHERED TROPICAL SOILS**

Este artigo foi publicado na European Journal of Agronomy.

<https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126763>

Flávio Araújo de Moraes<sup>1</sup>; Silvino Guimarães Moreira<sup>1\*</sup>; Devison Souza Peixoto<sup>2</sup>; Júnior César Resende Silva<sup>1</sup>; Júlia Rodrigues Macedo<sup>1</sup>; Matheus Marques Silva<sup>1</sup>; Bruno Montoani Silva<sup>1</sup>; Pedro Antônio Sanchez<sup>3,4</sup> e Márcio Renato Nunes<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Department of Soil Science, Federal University of Lavras, Av. Doutor Sylvio Menicucci 1001, CEP <sup>1</sup>ESAL, Universidade Federal de Lavras, Av. Doutor Sylvio Menicucci 1001, CEP 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brasil.

<sup>2</sup>Rehagro, Lavras, Minas Gerais, Brasil.

<sup>3</sup>Soil, Water, and Ecosystem Sciences Department, <sup>4</sup>Global Food Systems Institute, University of Florida, Gainesville, Florida, 32611, USA.

\* Corresponding author: [silvinomoreira@ufla.br](mailto:silvinomoreira@ufla.br)

Orcid: 0000-0002-3631-0305

Received 04 August 2022

Accepted 20 December 2022

## Abstract

Soil acidity is still a factor limiting crop yield in tropical soils. Our objective was to evaluate lime incorporation into the 0-40 cm depth as a strategy to improve soil chemical conditions and root growth within the soil profile and crop yield in highly weathered tropical soils. Lime rates ranging from 0 to 15 Mg ha<sup>-1</sup> were incorporated into the 0-40 cm depth in three Brazilian oxisols. Soil response to lime rates was evaluated in both 0-20 and 20-40 cm depths at the end of each spring/summer cropping season as were crop yields over three consecutive years after lime incorporation. Maize + *Brachiaria ruziziensis* roots were evaluated within the 0-60 cm depth three years after liming. Overall, incorporating lime significantly increased Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> contents, pH, and base saturation (BS) in the 0-40 cm depth, with lime rates  $\geq 9$  Mg ha<sup>-1</sup> having the greatest positive impact. By improving soil chemical conditions, the incorporation of high lime doses ( $\geq 9$  Mg ha<sup>-1</sup>) increased crop root growth in the soil profile (up to 60 cm deep) and led to higher rainfed crop yields. The highest annual crop yields were observed under lime rates between 9 and 15 Mg ha<sup>-1</sup>. Finally, incorporating high doses of lime into the soil profile decreased crop yield losses due to droughts. Combined, these results indicate that deep liming (40 cm) at the correct dose can increase the resilience of agricultural systems to water deficit and the yield potential of annual crops in highly weathered tropical soils.

**Keywords:** Liming; Soil acidity; Root system; plant resilience; tropical soils

## 1. Introduction

Brazil has potential to increase food production by recovering degraded pastures. It is estimated that 50-70 % of the total 170 million hectares of pasture in Brazil are degraded (Dias Filho, 2011). For instance, the degraded soils are acidic, with high toxic aluminum (Al) concentrations and low natural fertility (Fageria and Baligar, 2008; Lopes and Guilherme, 2016, Sanchez, 2019). Adequate soil management can decrease Al toxicity and increase nutrient availability being crucial to increase crop yields and avoid expanding agricultural areas into native vegetation.

Worldwide, liming is one of the most common practices to improve soil chemical properties (*i.e.*, reduce Al and Mn toxicity, maximize nutrient availability for plants, and decrease P immobilization), which can also increase physical and biological soil quality and enhance crop production (Fageria and Baligar, 2008; Li et al., 2019). Proper liming increases soil pH values to optimal levels, provides Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup>, neutralizes acidity and reduces toxic Al<sup>3+</sup> levels (Fageria and Baligar, 2008; Kunhikrishnan et al., 2016; Li et al., 2019; Sousa and

Lobato, 2004; van Raij, 2011; Sanchez, 2019). Increased  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  levels and soil acidity correction improve the soil condition for root growth (Fageria and Baligar, 2008), which is essential to increase crop yield and the resiliency of the production system, especially under rainfed systems.

In agricultural fields, lime is usually incorporated into the 0-20 cm depth by plowing and harrowing, under conventional tillage, or surface-applied without incorporation under no-till (NT) and pasture. However, depending on soil and climate conditions, lime migration into highly weathered soil profiles can be minimal (Nunes et al., 2019). Lime is relatively insoluble and does not move fast downward into the soil profile and its surface application or shallow incorporation is not effective to neutralizing Al toxicity below the application or incorporation zone (Santos et al., 2018a, 2018b). Consequently, subsurface soil acidity may result in limitations to deep root development in highly weathered soils and lead to crop yield decreases, especially under water deficits.

New liming strategies need to be developed to achieve faster lime response within deeper soil layers (Guarçoni and Sobreira, 2017; Teixeira et al., 2020a, 2020b). Lime incorporation into the 0-40 cm soil depths before initiating NT or pasture systems may result in fast and uniform amelioration of soil acidity within deep soil layers (Santos et al., 2018a, 2018b). In turn, it may improve root growth within the soil profile, increase root access to water and nutrients, increase crop yields and decrease crop losses due to short periods of drought (Ho et al., 2005; Lilley and Kirkegaard, 2011; Lynch, 2007; Wasson et al., 2012).

Past studies showed that lime incorporation up to 30 cm can reduce soil acidity and increase soil Ca and Mg content, root growth, and crop yield in Brazilian Oxisols compared to limestone incorporation up to 15 cm (Doss et al., 1979; Gonzalez-Erico et al., 1979). Recently, Moreira (2019) suggested that incorporating lime up to 40 cm deep to raise the pH,  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  to adequate levels and neutralize  $\text{Al}^{3+}$  may increase crop yields and increase crop resilience to climate change. Improving soil fertility within the soil profile increases crop root development, which can improve water and nutrients uptake by crops especially in areas with water limitation (Gómez et al., 2019). However, field studies are still needed to confirm the preliminary results and to define the correct lime doses associated with deep (40 cm) incorporation. Our hypotheses are that, depending on the dose, incorporating lime into the 0-40 cm soil depth: (i) improves soil chemical properties and root growth within that layer, (ii) increases crop yields, and (iii) and improves crop yield resilience under water deficits in highly weathered tropical soils. Our objective was to evaluate the effects of lime rate incorporated into

the 0-40 cm depth on soil chemical properties, crop root growth and yield, and crop yield resilience in three highly weathered tropical soils.

## 2. Materials and methods

### 2.1 Experiment sites

The study was conducted under field conditions at three sites located in Lavras (Local1), Nazareno (Local2) and Ingai (Local3), Campo das Vertentes mesoregion, Minas Gerais, Brazil (Fig. 1). The soils are classified as Latossolo Vermelho-Amarelo according to the Brazilian Soil Classification System (Santos et al., 2018) and Typic Hapludox according to Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014). The climate of the mesoregion is Cwa with dry and cold winters and hot and humid summers. The average temperature range between 30 °C and 11 °C. Rainfall during the study period can be observed in Fig. 2.

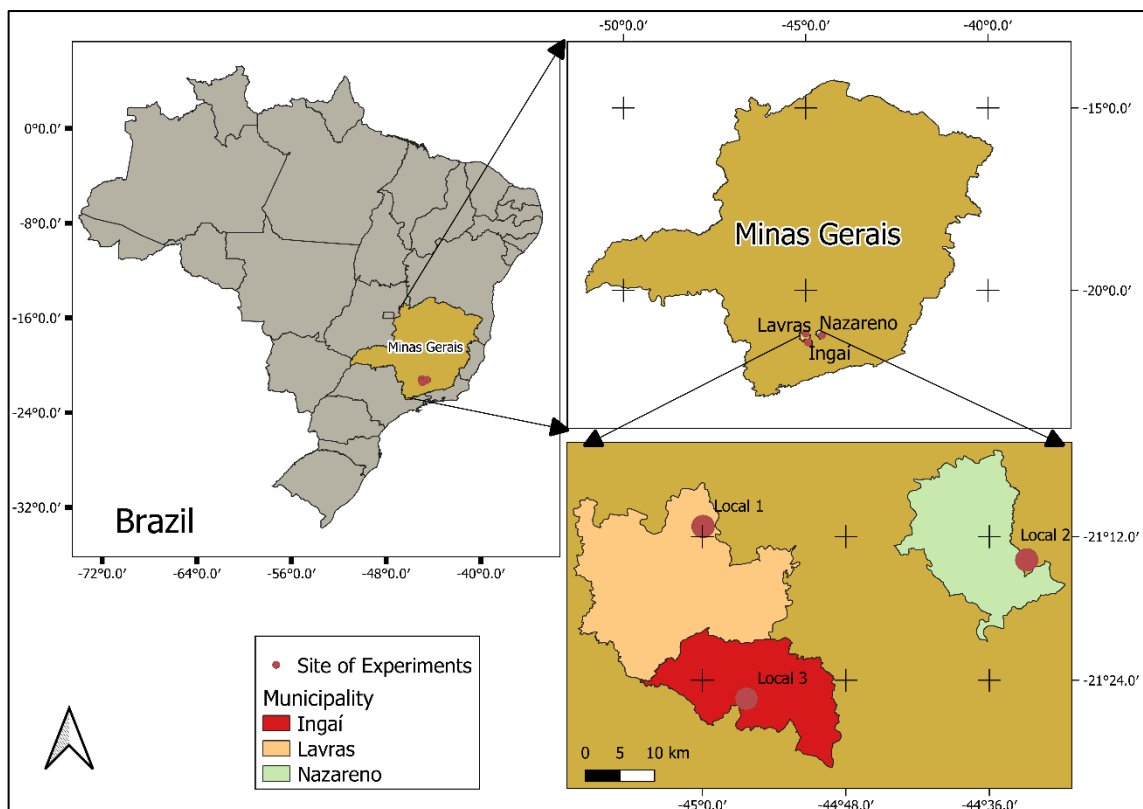


Fig. 1. Details of the three sites where the experiments were conducted over three years.

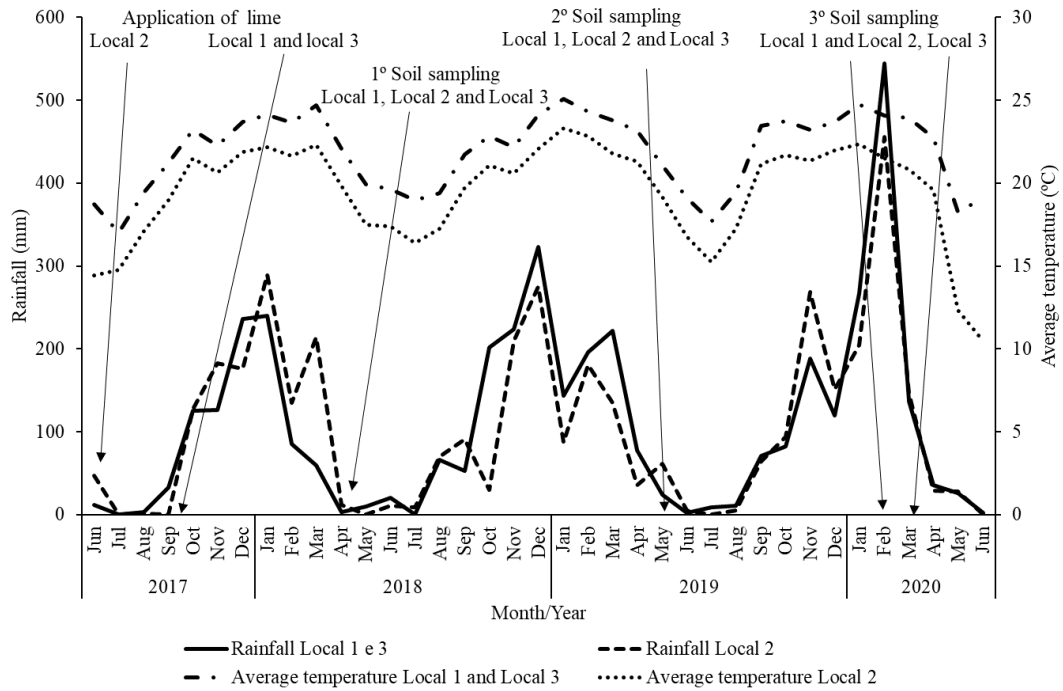


Fig. 2. Rainfall distribution and average temperature during the three years of the study.

The experiments were conducted independently at the three sites. Before setting up the experiments, soils were cultivated with maize and extensive pastures. However, there was very little use of fertilizers and amendments under that system. In addition, no agricultural activity had been conducted on those soils for at least two years. The characteristics of the lime used in each location were as follow: Local1: Total relative neutralizing power (TRNP) = 83%, CaO = 44% and MgO = 14%; Local2: TRNP = 83%, CaO = 35% and MgO = 20%; and Local3: TRNP = 77%, CaO = 47% and MgO = 14%.

Soil physical and chemical characterization was performed prior to the initiation of the experiment using methods described by Silva (2009). Soil samples were air dried at room temperature, crushed and sieved (<2 mm) for obtaining the air-dried fine earth, which was stored for further characterization. The soil chemical characteristics before the beginning of the experiments are shown in Table 1 and the soil physical characteristics in Table 2.

Table 1. Soil chemical properties by site and depth before the beginning of the study.

Depth	pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	CEC	BS	OM	B	Cu	Fe	Mn	Zn
cm	(Water)	mg dm <sup>-3</sup>				cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>			%	g kg <sup>-1</sup>		mg dm <sup>-3</sup>			
Local 1															
0–20	5.7	3.4	0.3	3.7	0.9	0.0	4.2	9.1	54	33	0.1	1.1	56	56	1.3
20–40	5.9	2.1	0.2	3.4	0.8	0.0	3.2	7.6	58	-	-	-	-	-	-
Local 2															
0–20	5.7	1.7	0.1	1.4	0.5	0.0	2.7	4.7	42	26	0.6	3.5	41	25	0.4
20–40	5.7	0.8	0.1	1.1	0.7	0.0	2.4	4.3	44	-	-	-	-	-	-
Local 3															
0–20	5.2	2.8	0.1	1.4	0.8	0.0	7.2	9.5	24	33	0.2	1.0	25	6.3	0.8
20–40	5.2	2.3	0.1	0.9	0.4	0.0	4.0	5.4	25	-	-	-	-	-	-

pH - pH in water (1:2.5 soil/solution); OM - soil organic matter ( $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  4 mol L<sup>-1</sup> +  $\text{H}_2\text{SO}_4$  5 mol L<sup>-1</sup>) (Silva 2009); P and K mixed resin (Van Raij et al., 1986); Fe, Zn, Mn and Cu (Silva, 2009); Ca, Mg e Al (KCl 1 mol L<sup>-1</sup>); S - Sulfur extracted as sulfate and the result was converted to S, (H+Al) - potential acidity (SMP). CEC - cation exchange capacity at pH 7.0 obtained by adding Ca, Mg, K and H+Al; and base saturation [BS = ((Ca+Mg+K+H+Al)/CEC) × 100].

Table 2. Sand, silt, and clay contents and texture of the soil by site and depth.

Depth	Sand	Silt	Clay	Textural classification
cm	g kg <sup>-1</sup>			
Local 1				
0–20	235	303	462	Clay
20–40	239	277	485	Clay
Local 2				
0–20	251	208	541	Clay
20–40	232	197	571	Clay
Local 3				
0–20	444	161	395	Clay Loam
20–40	425	153	422	Clay

Clay and silt (pipette method); sand (sieving) (Silva, 2009).

## 2.2 Experimental design and field trials

At each site, trials were conducted using a randomized block design with six treatments and four replicates. The treatments consisted of six lime rates (0, 3, 6, 9, 12, and 15 Mg ha<sup>-1</sup>) applied using the Bruttus 6000 (Stara©) gravity spreader, with an application range of 4.4 m. Rather than surface application or shallow (0-20 cm), as often recommended in Brazil (Alvarez V. and Ribeiro, 1999; Cantarella et al., 2022), limestone rates were incorporated up to 40 cm. After surface-applied, limestone was incorporated into the 0-40 cm soil layer with two heavy harrow passes (Piccin© heavy harrow 14x32" - 14 discs with 32-inch), followed by subsoiling



(Baldan© 5-shank subsoil plow) and two slight disc harrow passes (Baldan© leveling harrow with 20 discs of 26 inch – 270 mm). The size of each plot was 8.74×30 m (262 m<sup>2</sup>).

During the study, limestone was applied only once (i.e., in 2017) at the beginning of the study. The different lime rate application trials began on 06/27/2017, 09/14/2017, and 09/20/2017 at the Local2, Local1, and Local3, respectively. After lime incorporation, crops were planted during the 2017/2018 in the first season (October to February) and all operations were performed according to the farmer's management practices, including choice of cultivars, and fertilization (Table 3), pest control, weed, and disease management. Soybean (*Glycine max*), maize (*Zea mays*), common bean (*Phaseolus vulgaris*) and wheat (*Triticum* spp.) were cultivated during the experiment. The production system of each research site was determined by farmers. Second season crops (wheat in April and maize in February) were grown only in Local2 and Local3, in the second (2018/19) and third (2019/20) year (Table 3).

The application of lime was done only in the first year, turning the soil over. After the first year, there was no soil disturbance, and all cultivation was under no-till (NT). The crops described in Table 3 were sown at depths of 3-5 cm, with deposition of planting fertilizers at about 10-12 cm depth, except for wheat, in which the depth of the seeds was about 3 cm and of the fertilizer 6 cm, due to the limitations of the seeder. For this operation, fertilizer NT seeders were used. At Local1, the seeder Jumil®– model JM 2570 with 4 rows was used; at Local2 and Local3, the machine available was the seeder Kuhn® – model PG 1000, with 10 sowing rows. For winter cultivation, the Prima® model 4590 seeder was used, with 27 rows in Local2 and Local3. Sowing operations in first season crops were always carried out about 10 to 15 days after weed desiccation. The crops of second season (wheat and maize) were sown immediately after the first season crops were harvested.

At Local1, total rainfall accumulation was 655, 1087 and 1045 mm, respectively during the first seasons (October to February) of 2017/18, 2018/19, and 2019/2020 (Fig. 2). In the first growing season, a water restriction lasting 16 days was recorded, which coincided with the phenological stage of soybean grain filling.

At Local2 no dry spells were observed during crop development in the first season. Total rainfall accumulation, during first seasons 2017/18, 2018/19 and 2019/20 were 954, 855 and 468 mm, respectively (Fig. 2). In the second season of the 2018/19 growing season at Local2, 74 mm was recorded during the wheat cycle. However, 69 mm were recorded in the first 29 days. Thus, the greatest water restriction occurred during the reproductive stage of the crop. In the second season of the 2019/20, the accumulated precipitation during maize growing was 300 mm. However, most of the precipitation occurred until about 45 days after sowing. During the

15 days that preceded the flowering of the crop, rainfall accumulation was 16.5 mm. After flowering, no precipitation was recorded for 16 days. After this period, until the phenological stage R4, rainfall accumulation was only 28.3 mm, and it stayed dry until R6 (physiological maturation).

At Local3, rainfall accumulation during the growing season of each crop was 191, 1060 and 1047 mm, respectively, during the first season of 2017/18, 2018/19 and 2019/2020 (Fig. 2). In the first crop, 18 days after flowering, an accumulation of 49.3 mm was observed. After this period, the crop underwent water restriction until harvest. In the other first season crops, no dry spells were observed. At Local3, recorded rainfall during the wheat growing of second season of 2018/19 was 49 mm, with 39 mm, which was accumulated between the first days after sowing and part during the flowering of the crop. Thus, during grain filling, there were at least 30 days of no rain. In the second season in 2020, the recorded rainfall was 26 mm, with 23 mm recorded in a single day during the flowering stage, thus marking a long dry spells period, during the grain filling phase of the crop.

Table 3. Crops and fertilization history within the three experimental sites.

Site	Year	Crop	Cultivar	Population (Seeds/ha)	Sowing	Harvest	Sowing fertilizer NPK	Dose (kg/ha)	Topdressing: KCl (kg/ha)	Topdressing: NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (kg/ha)
Local 1	2017/18	Soybean	M 6410 IPRO	290,000	11/25/2017	04/12/2018	02:30:30	300	0	0
	2018/19	Soybean	M 6410 IPRO	290,000	10/30/2018	03/19/2019	8-40-00-12.5 S	200	100	0
	2019/20	Soybean	M5917IPRO	300,000	10/27/2019	02/19/2020	13-33-00	150	200	0
Local 2	2017/18	Soybean	NS 7670 RR	280,000	11/15/2017	04/17/2018	08:40:00	200	250	0
	2018/19	Soybean	NS 7670 RR	280,000	11/10/2018	03/31/2019	09:43:00	250	400	0
	2019/19	Wheat	BRS 264	4,000,000	04/18/2019	07/27/2019	11:54:00	200	0	150
	2019/20	Common Bean	IPR Tuiuiú	240,000	11/05/2019	02/01/2020	13-33-00 S15	250	200	205
	2020/20	Maize/Brachiaria <sup>1</sup>	P3646	62,000	02/18/2020	07/12/2020	13-33-00	250	0	340
Local 3	2017/18	Common Bean	Perola	206,000	01/28/2018	04/28/2018	09:43:00	200	200	272
	2018/19	Soybean	SYN 13671 IPRO	280,000	11/13/2018	03/31/2019	11:54:00	200	200	0
	2019/19	Wheat	BRS 264	4,000,000	04/15/2019	07/27/2019	11:54:00	100	0	120
	2019/20	Soybean	Foco IPRO	290,000	11/03/2019	03/18/2020	11:54:00	200	170	0
	2020/20	Wheat	BRS 264	4,000,000	04/20/2020	07/30/2020	11:54:00	100	0	120

1 Brachiaria (*Brachiaria ruziziensis*) intercropped with maize and planted at the same time as maize.

### 2.3 Soil sampling

Soil sampling was carried out on the same day as the harvest of each crop grown in first season in the 2017/18, 2018/19 and 2019/2020. In Local1, from the first to the third year, the precipitation accumulated until the day of soil sample collection was 908, 2346 and 3649 mm, respectively. At Local2, the accumulated rainfall over the three years was 1131, 2237 and 3126 mm, respectively. At Local3, the accumulated rainfall until the day of soil sampling from the first to the third year was 908, 2366 and 3804 mm, respectively (Fig. 2).

Soil samples were taken from 0-20 and 20-40 cm depths. For each depth, five samples per plot were taken and mixed to make a composite sample. All samples were air-dried, ground, and passed through a 2-mm sieve and analyzed for selected soil physical and chemical characteristics.

Soil chemical properties (i.e., soil pH,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , and exchangeable  $\text{K}^+$  and  $\text{H}+\text{Al}$ ) were determined following methods described by Silva (1999). Soon after, soil pH was determined in water (1:2.5 soil/water ratio).  $\text{K}^+$  was extracted by Mehlich-1 solution ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.0125 mol L<sup>-1</sup> and HCl 0.05 mol L<sup>-1</sup>) at a ratio of 1:10 (v/v) soil/solution and determined by flame emission spectroscopy. Exchangeable  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  were extracted using a KCl 1 mol L<sup>-1</sup> (1:10 v/v soil/solution) and determined by atomic absorption spectrophotometry with air-acetylene flame and 5 % lanthanum solution to prevent interference. Potential acidity ( $\text{H}+\text{Al}$ ) was extracted with  $\text{Ca}(\text{OAc})_2$  0.5 mol L<sup>-1</sup> buffered at pH 7.0. The sum of exchangeable basic cations ( $\text{SB} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+$ ), cation exchange capacity at pH 7.0 ( $\text{CEC} = \text{SB} + \text{H}+\text{Al}$ ), and base saturation [ $\text{BS} = ((\text{Ca}+\text{Mg}+\text{K}+\text{H}+\text{Al})/\text{CEC}) \times 100$ ] were then estimated.

### 2.4 Root distribution

In the second season of 2020, on 04/30/2020, roots were evaluated in the maize intercropped with *Brachiaria* grass (*Brachiaria ruziziensis*) at Local2. The trench was dug when the maize crop reached phenological stage R1 (female flowering - maize cobs with stigma-style presence). Six trenches were dug transverse to the planting row, one for each lime rate treatment. In each trench, the roots of three plants were exposed, and a 42×60-cm area was evaluated per plant. A backpack sprayer was used to clean the soil profile for root exposure. After cleaning and exposing the roots, photographs were taken and analyzed in software for fiber and root image analysis, Safira 1.1 (Jorge and Silva, 2010). From the image analysis, root length (mm cm<sup>-2</sup>), surface area (mm<sup>2</sup> cm<sup>-2</sup>), and volume (mm<sup>3</sup> cm<sup>-2</sup>) were determined.

## 2.5. Crop yield

Grain yield was determined by harvesting three 5-meter-long rows per experimental plot. Grain moisture was standardized to 13%, and the yield of the area per plot was defined. The yield per hectare (10,000 m<sup>2</sup>) was estimated from the yield per plot.

## 2.6 Statistical analysis

Data was analyzed with analysis of variance, and when there was a difference among limestone rates (treatments), a regression analysis was performed. The pH, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, and BS in the 0–20 and 20–40-cm layers, root length, surface area, and volume in the 0–20, 20–40 and 40–60-cm layers, and crop yield data were evaluated as a function of the limestone rates (0, 3, 6, 9, 12, and 15 Mg ha<sup>-1</sup>). The tested models were linear, quadratic, and linear-plateau. The model choice was based on the significance of the goodness-of-fit parameters, lowest Akaike Information Criterion (AIC) and highest coefficient of determination (R<sup>2</sup>). A regression analysis between maize yield and root parameters (length, area, and volume) was performed. All analyses and graph drawing were done with R version 3.6.3 software (R Development Core Team, 2019).

## 3. Results and discussion

### 3.1 Soil chemical properties

Lime incorporation into the 0-40 cm depth increased Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, soil pH in water, and base saturation (BS) values in both 0-20 and 20-40 cm layers (Fig. 3-6). Most of the relationships between these soil chemical properties and limestone rates were linear or quadratic, which is in line with other studies (Crusciol et al., 2016; Esper Neto et al., 2019; Fageria, 2001b; Fageria and Baligar, 2008), however, the plateau behavior was also observed. The best-fit model may depend on the initial fertility and soil type, limestone characteristics, and rate applied (Li et al., 2019). In addition, the plateau model has been minimally tested, which explains its absence from studies that have evaluated lime rates.

In the first year, the positive response of soil chemical properties to lime rates in both 0-20 and 20-40 cm layers was similar, which suggests that lime incorporation was adequate (Fageria and Baligar, 2008). From the second year onwards, the impact of lime rates on chemical properties was higher in the 0-20 cm than in the 20-40 cm layer. This difference between layers (0-20 and 20-40 cm) from the second year onwards can be linked to two main factors: (i) faster lime reaction in the topsoil, since the environmental factors (*i.e.*, temperature

and moisture) that drive lime reaction in the soil (Fageria and Baligar, 2008) are more active in the topsoil compared to subsoil layers; and (ii) leaching of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  (Fageria et al., 1991; Fageria, 2001a), which reduced pH and BS in the 20-40 cm layer. Difference between layers was minimal at Local 1, where the soil had higher initial  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , pH and BS values. Leaching in the 0-20 cm layer was not observed due to the high concentrations of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  in the underlying layer (20-40 cm). These results indicate that the application of the correct limestone rate enables the soil acidity correction and the  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  increase below the layer where soil acidity corrector is incorporated (Fageria et al., 1991; Fageria, 2001a).

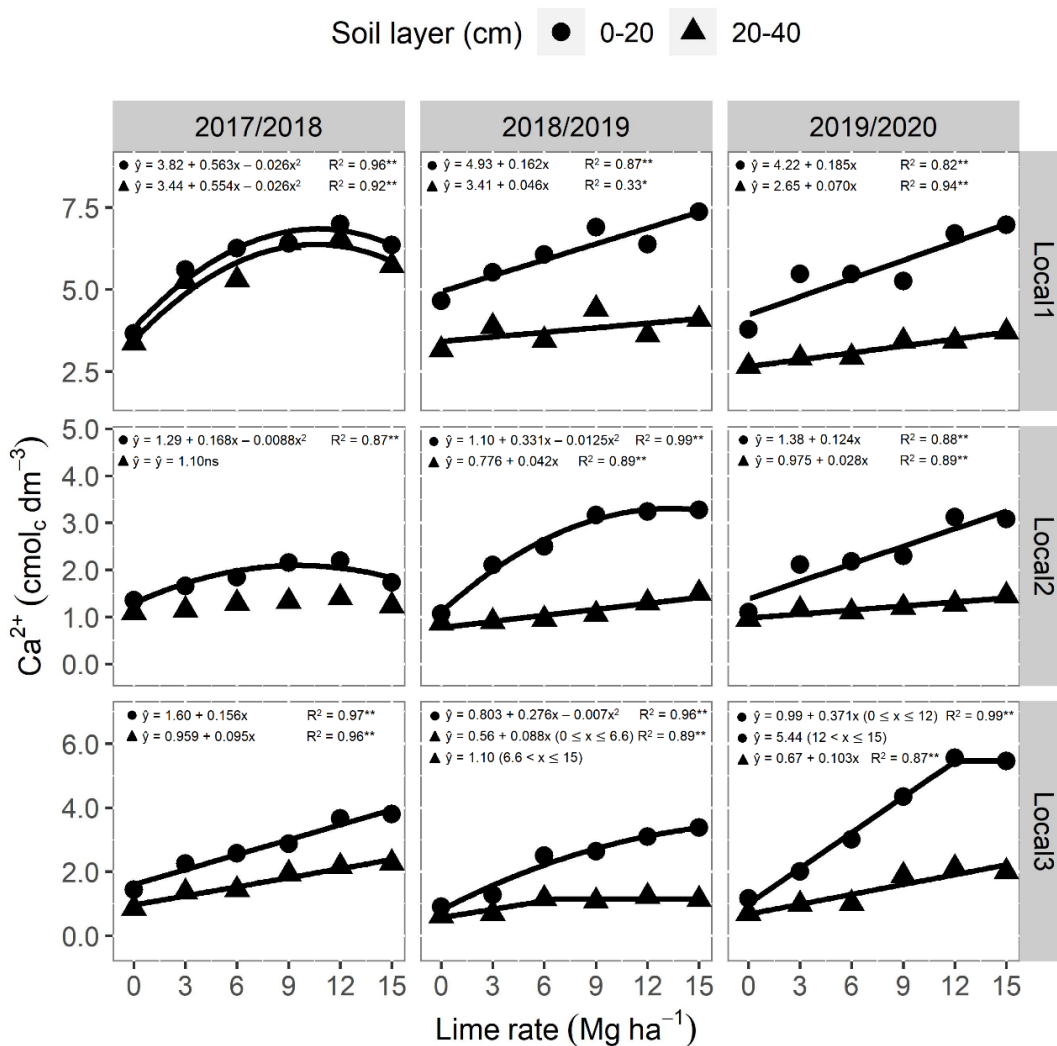


Fig. 3. Exchangeable  $\text{Ca}^{2+}$  by soil layer, site (Local1, Local2, and Local3) and cropping season (2017/2018, 2018/2019, and 2019/2020) as a function of lime rates incorporated in the 0-40 cm layer.

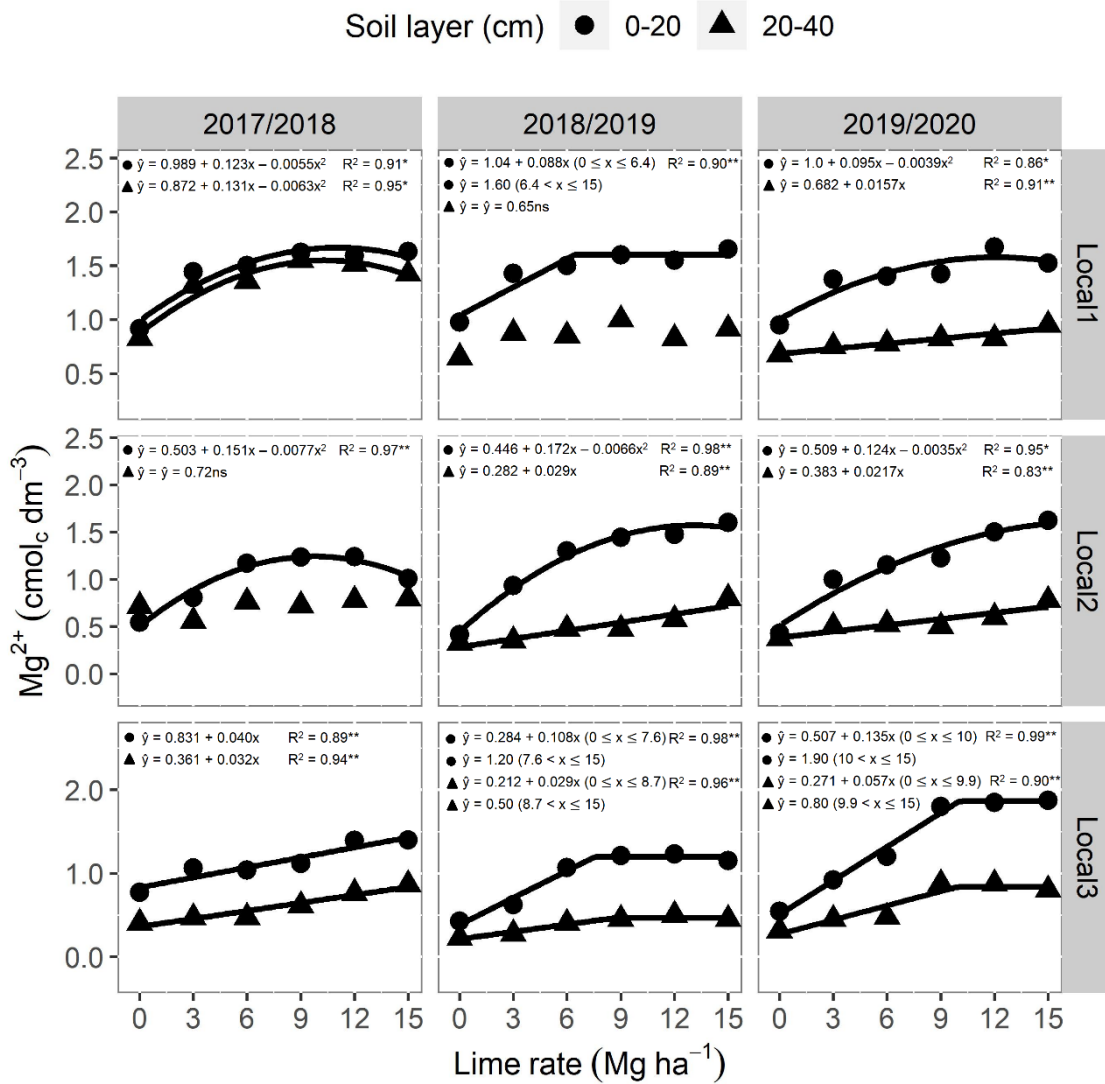


Fig. 4. Exchangeable  $\text{Mg}^{2+}$  by soil layer, site (Local1, Local2, and Local3) and cropping season (2017/2018, 2018/2019, and 2019/2020) as a function of lime rates incorporated in the 0-40 cm layer.

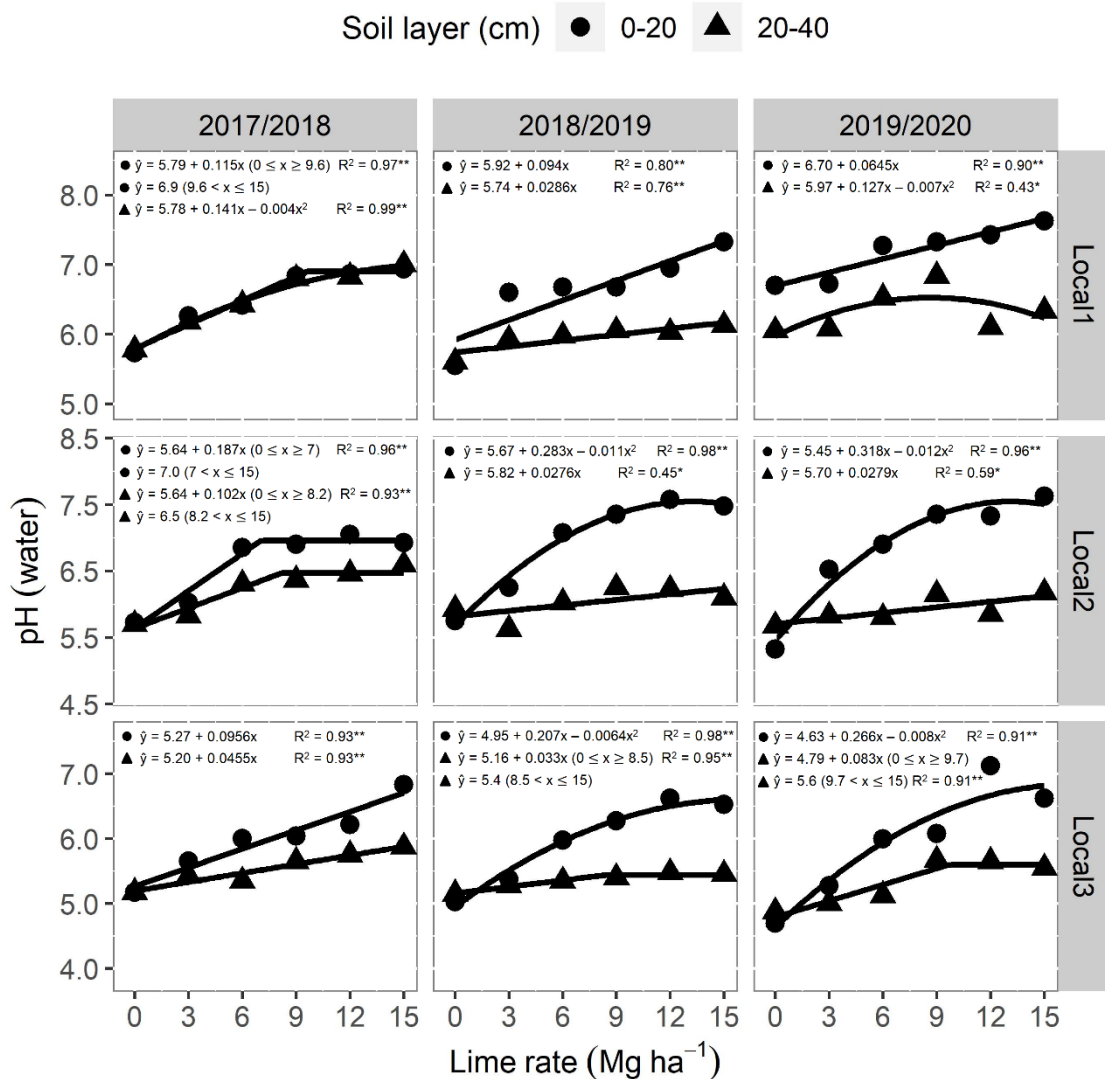


Fig. 5. Soil pH by soil layer, site (Local1, Local2, and Local3) and cropping season (2017/2018, 2018/2019, and 2019/2020) as a function of lime rates incorporated in the 0-40 cm layer.

Based on the fitted models, the best limestone rates to increase  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , pH, and BS values were those between 9.0 and 15.0  $\text{Mg ha}^{-1}$  recommended for the 0-40 cm layer. These optimal doses are higher than lime rates that would be calculated by the base saturation (Cantarella et al., 2022) and neutralization of exchangeable  $\text{Al}^{3+}$  with increased  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  (Alvarez V. and Ribeiro, 1999) methods. Considering the results of the soil analysis of the 0-40 cm layer before the beginning of the experiments, the doses calculated with the liming recommendation method most used in Brazil to increase base saturation to 70% of the 0-40 cm layer (Cantarella et al., 2022) would be 0  $\text{Mg ha}^{-1}$  (Local1), 4.64  $\text{Mg ha}^{-1}$  (Local 2) and 7.43  $\text{Mg ha}^{-1}$  (Local 3).



The effect of lime rates on soil chemical attributes depends on several factors including lime type and its particle size (Álvarez et al., 2009; Li et al., 2019), soil buffering capacity and organic matter content (Bolan et al., 2003; Li et al., 2019), soil acidity, Ca and Mg contents, participation of cations in CEC and base saturation. In Brazil, lime rates have been recommended to achieve soil pH values between 6,0 and 6,5, base saturation between 50 and 70%, and Ca and Mg contents  $>2.4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  and  $>0.9 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , respectively, considered ideal to crop development, besides neutralizing toxic Al up to the 0 to 20 cm layer (Alvarez V. and Ribeiro, 1999, Cantarella et al., 2022).

The positive impact of lime rates on soil chemical properties was similar in the first, second and third year after lime incorporation in all three sites. These results suggest that the reaction of lime was uniform over time. In a recent meta-analysis, Li et al. (2019) showed that the limestone reaction time occurred in the first three years after its application, corroborating our results. During the three years of study, lime rates  $\geq 9 \text{ Mg ha}^{-1}$  were able to maintain soil pH, BS, and Ca and Mg contents above the values considered optimum for crop development in soils under the Cerrado conditions (Alvarez V. and Ribeiro, 1999). Therefore, new applications of lime are not recommended in this period (0-3 years).

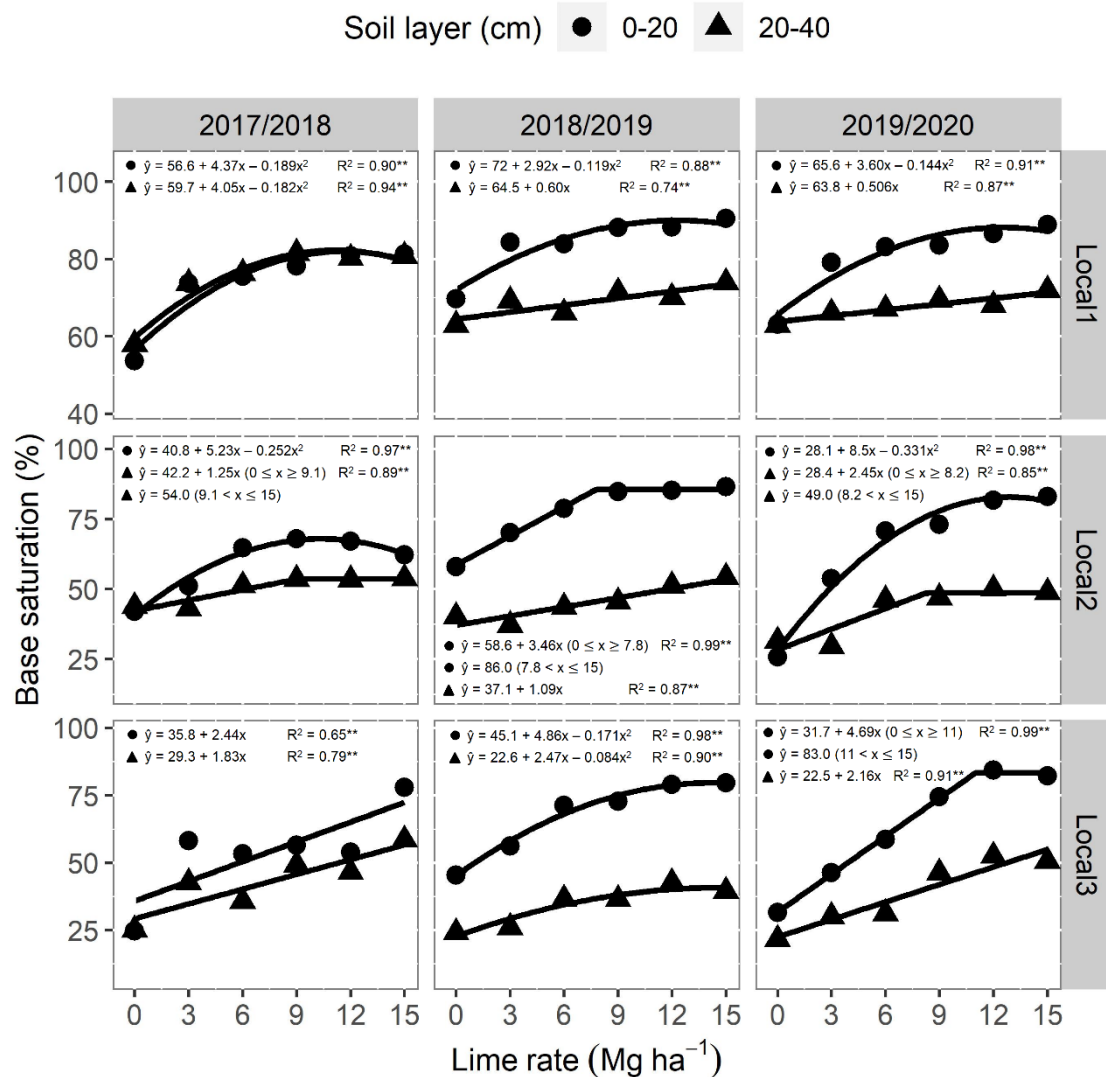


Fig. 6. Soil base saturation by layer, site (Local1, Local2, and Local3) and crop season (2017/2018, 2018/2019, and 2019/2020) as a function of lime rate incorporated in the 0-40 cm layer.

### 3.2 Root growth

A visual analysis of root distribution within the soil profile shows that lime incorporation into the 0-40 cm soil depth clearly increased crop root growth within deeper soil layers (0-60 cm), with rates  $\geq 9 \text{ Mg ha}^{-1}$  having the greatest positive impact (Fig. 7). There was a significant positive linear effect of lime rates on the root length, surface area and volume of the maize + brachiaria crops (Fig. 8). The positive effect of lime rates on root growth was greater in the 0-20 cm layer, followed by 20-40 and 40-60 cm depths, according to the slope values of the fitted linear models. Improved root growth in the soil profile reflects the improved

soil chemical condition due to the lime incorporation up to 40 cm deep (Fageria and Baligar, 2008), especially for lime rates  $\geq 9$  Mg ha<sup>-1</sup> (Gonzalez-Erico et al., 1979; Miranda and Rowell, 1987; Gaiser et al., 2004; Haling et al., 2010; Bortoluzzi et al., 2014; Santos et al., 2018). These results are in line with past studies that have shown that liming increased soybean (Bortoluzzi et al., 2014), common bean (Silva et al., 2004), wheat (Caires et al., 2008, 2006), and maize (Friesen et al., 1980; Harun et al., 2015) root growth in the soil profile.

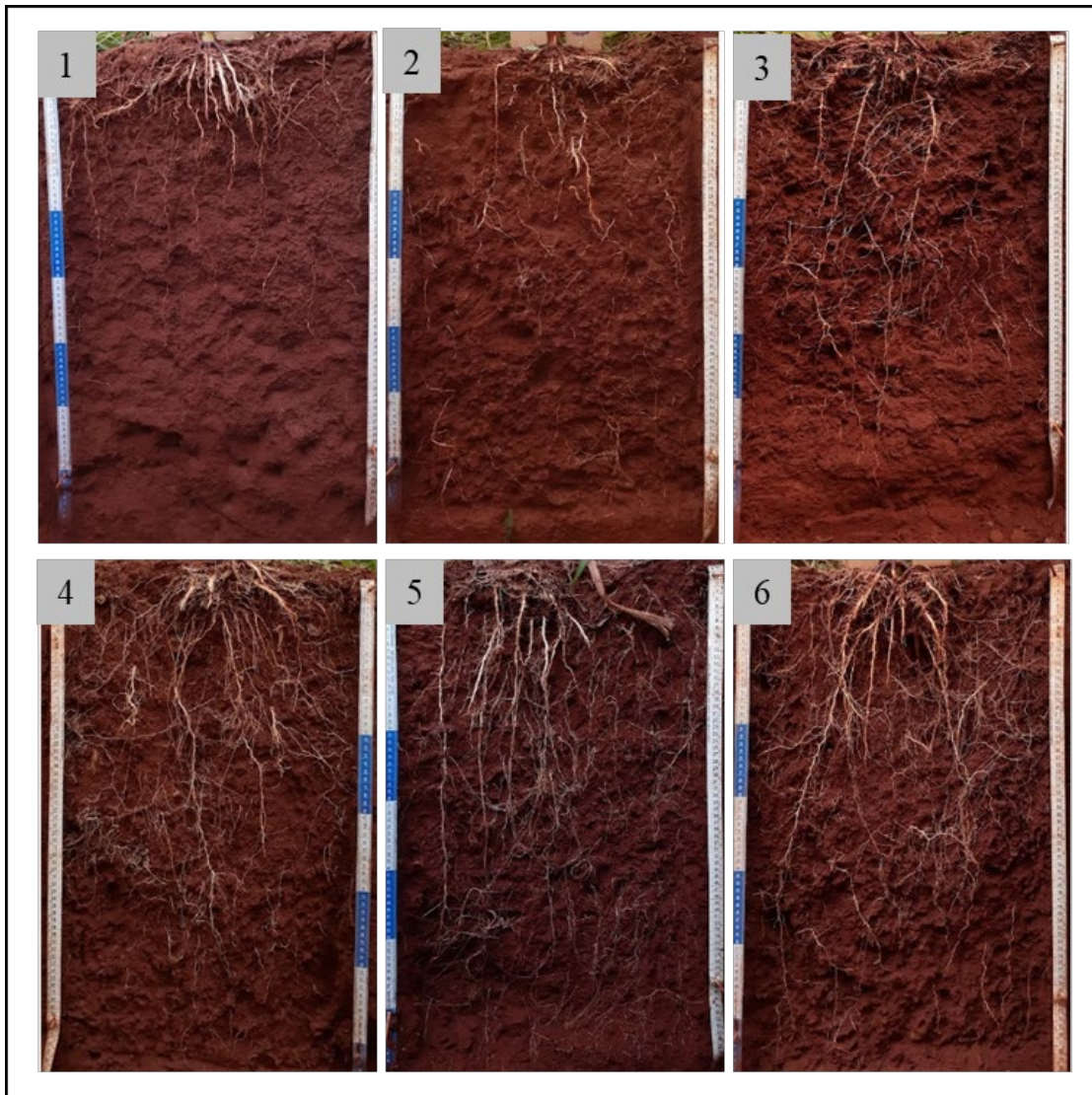


Fig. 7. Maize + brachiaria root distribution in the soil profile as a function of lime rates (1 = 0 Mg ha<sup>-1</sup>; 2 = 3 Mg ha<sup>-1</sup>; 3 = 6 Mg ha<sup>-1</sup>; 4 = 9 Mg ha<sup>-1</sup>; 5 = 12 Mg ha<sup>-1</sup>; 6 = 15 Mg ha<sup>-1</sup>) incorporated into the 0-40 cm depth.

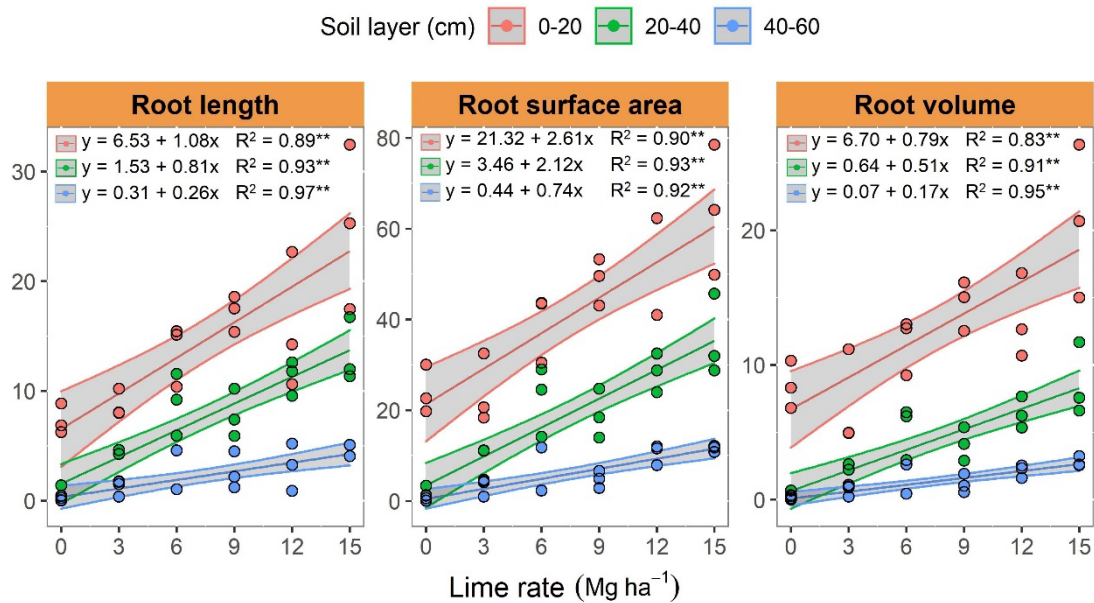


Fig. 8. Length ( $\text{mm cm}^{-2}$ ), surface area ( $\text{mm}^2 \text{cm}^{-2}$ ), and volume ( $\text{mm}^3 \text{cm}^{-2}$ ) of roots of maize + brachiaria by soil layer as a function of the lime rates incorporated in the 0-40 cm layer.

Aluminum toxicity and nutrient deficiency (e.g.,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , P, and  $\text{K}^+$ ) are the main chemical limiting factors of plant root growth in acid tropical soils (Fageria and Baligar, 2008; Haling et al., 2010; Keltjens and Dijkstra, 1991; Keltjens and Tan, 1993; Kunhikrishnan et al., 2016; Lopes and Guilherme, 2016; Miranda and Rowell, 1987; Sade et al., 2016; Sanchez, 2019). As the soils of the three locals did not present exchangeable Al (Table 1), the greater root development (Fig. 7 and 8) can be linked to the increased Ca and Mg contents in the soil profile promoted by liming (Fig. 3). Low Ca contents, as those initially observed in the soil of Local 2 and 3 (Table 1), can restrict root growth in the soil profile (Bortoluzzi et al., 2014; Santos et al., 2018) and increase yield losses due to water stress (Gonzalez-Erico et al., 1979; Miranda and Rowell, 1987; Gaiser et al., 2004; Haling et al., 2010). The impact of  $\text{Ca}^{2+}$  on root development occurs because Ca is part of the cell wall and is a component of hormonal peptides, which are linked to the cell elongation process (Ritchey et al., 1995).

There was a significant linear positive correlation between root growth (length, surface, and volume) and crop yield in Local 2 (Fig. 9). The variable that best explained the relationship between maize yield and root growth was root length ( $R^2$  ranging from 0.51 to 0.64 depending on the soil layer evaluated). The greatest maize yield increase occurred with the increase in root growth in deeper soil layers, as can be observed by the higher slope in the 40-60 cm layer, followed by 20-40 and 0-20 cm, for all three root variables. The linear regressions (Fig. 9) suggest that for each 1 cm increase in root length in the 0-20, 20-40, and 40-60 cm layers, maize

yield increased 1.01, 1.60, and 3.70 Mg ha<sup>-1</sup>, respectively. For each 1 cm<sup>2</sup> increase in root surface area in the 0-20, 20-40, and 40-60 cm layers, maize yield increased by 0.40, 0.59, and 1.47 Mg ha<sup>-1</sup>, respectively. For each 1 cm<sup>3</sup> increase in root volume in the 0-20, 20-40, and 40-60 cm layers, the maize yield increased by 1.15, 2.27, and 6.14 Mg ha<sup>-1</sup>, respectively.

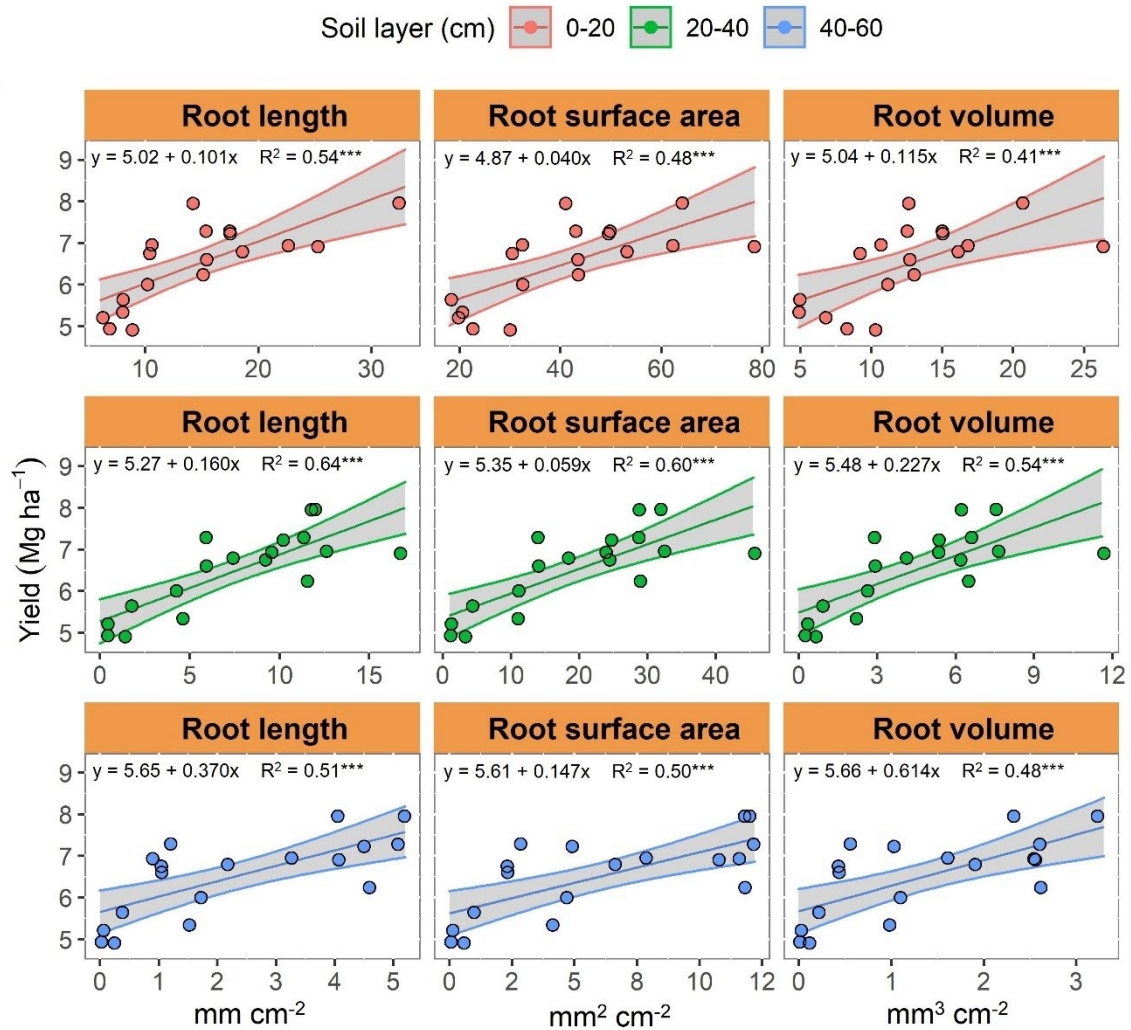


Fig. 9. Relationships between maize yield during the 2020 second season and root length, surface area, and volume of maize + brachiaria at depths of 0-20, 20-40, and 40-60 cm.

### 3.3 Crop yield

Crop yield increased with lime incorporation. However, crop yield response to lime incorporation varied with crop type, site, lime rate, and time after liming (Fig. 10). Yield increases were expected since limestone rates improved soil chemical conditions (Fig. 3-6) and led to higher root growth within the soil profile (Fig. 7-8), which can have a positive effect on crop yield (Fageria and Baligar, 2008; Kunhikrishnan et al., 2016; Li et al., 2019). In general,

as also observed for the soil chemical properties, the greatest crop yield increases were found for lime rates between 9 and 15 Mg ha<sup>-1</sup> (Fig. 10). It is worth noting that, based on the initial soil chemical conditions, the most traditional lime recommendation methods used in the studied region (Brazilian Cerrado) would not recommend liming for Local 1 and would recommend lower than ideal limestone doses for Local 2 and 3. However, crop yield still responded to high lime doses incorporated into the 0-40 cm soil depth.

The lime rates for greatest yield ( $\geq 9$  Mg ha<sup>-1</sup>) increased the pH in water values to 6.8-7.7, the BS to 83-88%, and the percentage of Ca<sup>2+</sup> in the CEC to 50-70% and Mg<sup>2+</sup> in the CEC to 20-30% in the 0-20 cm layer. In the 20-40 cm layer, the pH (water) values were in the range of 5.6-6.5, BS 50-70%, percentage of Ca<sup>2+</sup> in the CEC to 30-50%, and Mg<sup>2+</sup> in the CEC to 10-20%. These pH and BS values in the 0-20 cm layer are above the general target values between 6-6.5 and 50-70%, respectively, recommended in the liming recommendation used in the Cerrado region (Alvarez V. and Ribeiro, 1999; Sousa and Lobato, 2004; Cantarella et al., 2022). Those recommendations were developed with studies carried out in the 80's and 90's and were essential to transform Brazilian agriculture. However, in the current scenario of production with more productive and acidity-sensitive cultivars and with increasingly constant dry spells (Lopes and Guilherme, 2016), it is increasingly necessary to increase the resilience of plants, for example, providing conditions to develop your root system. The 0-20 cm soil layer dries faster thus, a more robust and deeper root system promotes root growth to deeper layers increasing plant resilience (Sanchez, 2019).

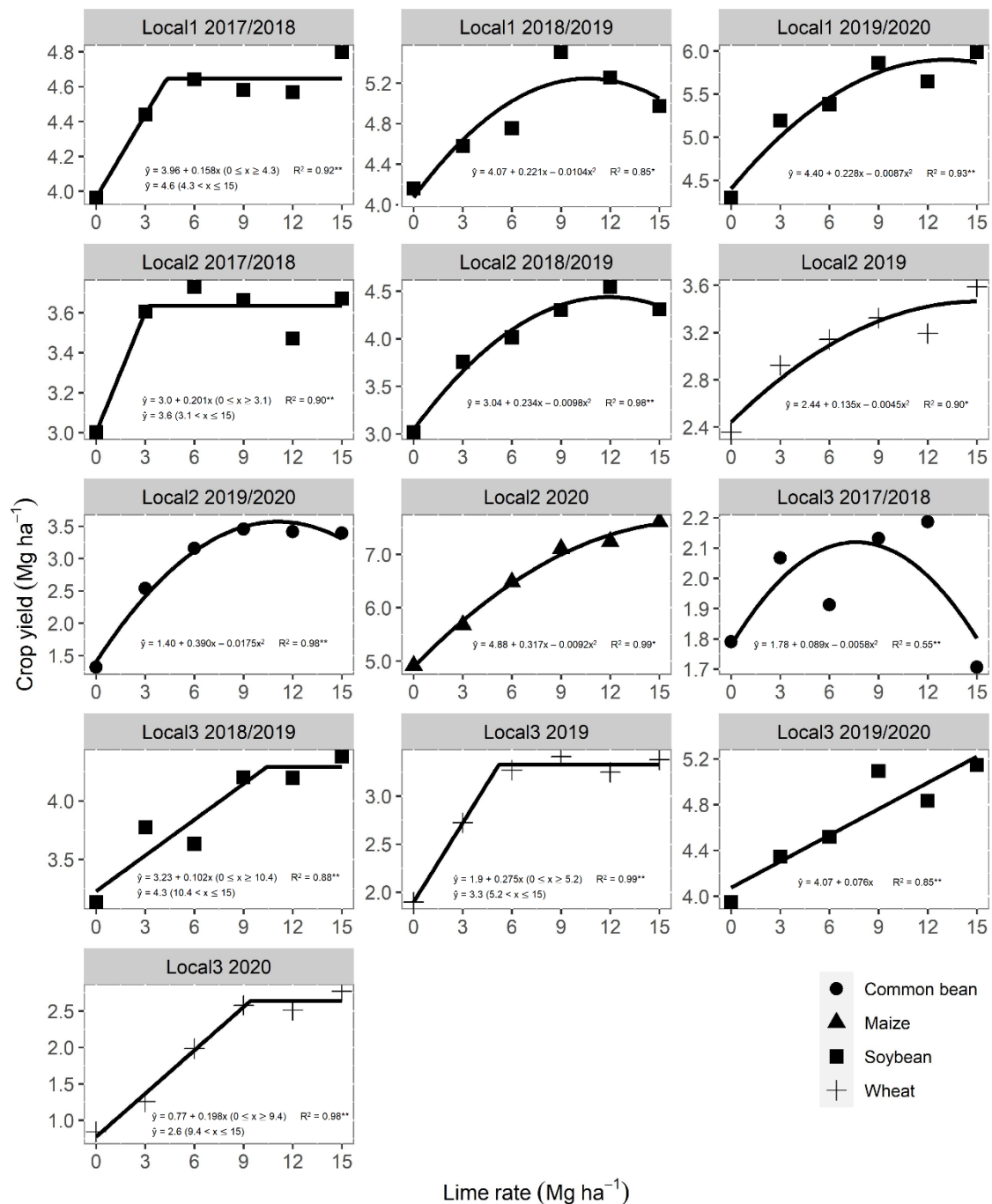


Fig. 10. Soybean, maize, common bean, and wheat yield as a function of the lime rate incorporated in the 0-40 cm layer in three sites (Local1, Local2, and Local3).

During the second season at Local2, maize crop experienced a dry period during the beginning of the reproductive phase (the greatest water requirement by maize). However, in the soil where 15 Mg ha<sup>-1</sup> of limestone was incorporated, maize yield was 55.5% (7.62 Mg ha<sup>-1</sup>) higher than in the control plot (4.9 Mg ha<sup>-1</sup>). It is worth mentioning that the entire maize crop cycle, from planting to harvest, took place with only 300 mm of water. During one of the most

demanding periods of maize cultivation, 15 days that preceded the flowering of the crop and 16 days after flowering, rainfall accumulation was only 16.5 mm. Between the end of this period and the phenological stage R4, rainfall accumulation was only 28.3 mm. From there until R6 (physiological maturation) stage there was water restriction. More than four decades ago, when the opening of fields in the Brazilian Cerrado region was starting, some researchers demonstrated that deep liming increased crop yields compared to shallow incorporation (Doss et al., 1979; Gonzalez- Erico et al., 1979), but without explaining the reasons for this fact. In the current research, we showed that for the present production systems in Brazil, with first and second seasons, with cultivars more sensitive to acidity, lime rates incorporated up to 40 cm contributes to crop development (Fig. 10) by increasing soil fertility (Fig. 3-6) and root development within the soil profile (Fig. 8).

Incorporation of high lime doses ( $\geq 9 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) into the soil profile (0-40 cm) also improved crop resilience. Overall, improved soil fertility due to lime incorporation (Figs. 3-6) led greater root length, area, and volume within the soil profile (Fig. 8), which increased water and nutrient absorption by crops and increased crop yield even with water deficits (Ho et al., 2005; Lynch, 2007; Wasson et al., 2012). Caires et al. (2008) also found that crop (i.e., soybean, maize, and wheat) development respond to high doses of lime under water deficit in Brazil. Their study found more than 100% increase in root length and 210% increase in wheat yield resulting from limestone application. In addition to root growth, liming also improved water, P, and N use efficiency by maize (Gaiser et al., 2004; Victoria et al., 2019; Qaswar et al., 2020).

The maize plants that received the highest doses of incorporated lime presented visually greater development than those that did not receive lime (Fig. 11). This can be compared through the height of the plants of the treatments with a ruler of 2 meters that was positioned between the plants. For this reason, there was a good relationship between maize yield during the 2020 second season in Local2 and root length, surface area, and volume of maize + brachiaria at depths of 0-20, 20-40, and 40-60 cm (Fig. 9).





Fig. 11. Maize plants intercropped with Brachiaria as a function of limestone doses around 60 days after sowing. (1 = control; 2 = 6 Mg ha<sup>-1</sup>; 3 = 12 Mg ha<sup>-1</sup>).

Finally, these results of experiments at three sites and three years show the need for improvement in liming recommendation methods for highly weathered soils. The limestone rate should increase Ca and Mg percentage in the CEC of 0 to 20 cm layer to values around 60% and 20%, respectively. In addition, the conventional recommended liming values of BS of 50% to 70% (Alvarez V. and Ribeiro, 1999, Cantarella et al., 2022) can be increased to approximately 85%, since the values obtained in the field are different from those obtained through the calculations proposed by Cantarella et al. (2022).

#### 4. Conclusion

This field study focused on the effects of lime rates incorporated into the 0-40 cm depth on chemical properties, crop root growth within the soil profile, and crop yields in three highly weathered tropical soils. Overall, we concluded that: (i) incorporating high lime doses ( $\geq 9$  Mg ha<sup>-1</sup>) up to 40 cm deep improves soil chemical condition (*i.e.*, Ca and Mg contents, soil pH, and base saturation) within the 0-40 cm soil depth, which in turn significantly increases crop root growth (*i.e.*, root length, surface area, and volume) within the 0-60 cm layer; (ii) lime incorporation increased crop yields, with lime rates  $\geq 9$  Mg ha<sup>-1</sup> having the greatest positive impact; (iii) by increasing soil chemical condition to root development within the soil profile (0-60 cm), incorporating high doses of lime can improve crop yield resilience under water deficits in highly weathered tropical soils.

#### 5. Acknowledgements

We acknowledge the financial contribution of Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES – Finance Code 001), Department of Agriculture at Universidade Federal de Lavras (DAG – UFLA), and AMPAR. We also acknowledge G7

Agronegócios, Ingaí and Muquém Farms and GMAP study group for the support in conducting the experiment. The authors are thankful to the Laboratório 3RLab for their partnership in carrying out the analysis.

## 6. References

- Álvarez, E., Viadé, A., Fernández-Marcos, M.L., 2009. Effect of liming with different sized limestone on the forms of aluminium in a Galician soil (NW Spain). *Geoderma* 152, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.04.011>
- Alvarez V., V.H., Ribeiro, A.C., 1999. Calagem, in: Ribeiro, A.C., Guimarães, P.T.G., Alvarez V., V.H. (Eds.), *Recomendação Para o Uso de Corretivos e Fertilizantes Em Minas Gerais - 5ª Aproximação*. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, Viçosa, MG, pp. 43–60.
- Bolan, N.S., Adriano, D.C., Curtin, D., 2003. Soil acidification and liming interactions with nutrient and heavy metal transformation and bioavailability, in: *Advances in Agronomy*. pp. 215–272. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(02\)78006-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)78006-1)
- Bortoluzzi, E.C., Parize, G.L., Korchagin, J., Silva, V.R. da, Rheinheimer, D. dos S., Kaminski, J., 2014. Soybean root growth and crop yield in response to liming at the beginning of a no-tillage system. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 38, 262–271. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832014000100026>
- Caires, E.F., Corrêa, J.C.L., Churka, S., Barth, G., Garbuió, F.J., 2006. Surface application of lime ameliorates subsoil acidity and improves root growth and yield of wheat in an acid soil under no-till system. *Sci. Agric.* 63, 502–509. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162006000500013>
- Caires, E.F., Garbuió, F.J., Churka, S., Barth, G., Corrêa, J.C.L., 2008. Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. *Eur. J. Agron.* 28, 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.05.002>
- Cantarella, H., Quaggio, J.A., Mattos Jr., D., Boaretto, R. M., van Raij, B., Furlani, A.M.C., 2022. *Boletim 100: Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*, 1. ed. ed. IAC, Campinas, SP.
- Crusciol, C.A.C., Marques, R.R., Filho, A.C.A.C., Soratto, R.P., Costa, C.H.M., Neto, J.F., Castro, G.S.A., Pariz, C.M., de Castilhos, A.M., 2016. Annual crop rotation of tropical pastures with no-till soil as affected by lime surface application. *Eur. J. Agron.* 80, 88–

104. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.07.002>
- Dias Filho, M.B., 2011. Degradação de Pastagens : Processos, Causas e Estratégias de Recuperação, 4. ed. ed. Belém.
- Doss, B.D., Dumas, W.T., Lund, Z.F., 1979. Depth of Lime Incorporation for Correction of Subsoil Acidity 1 . Agron. J. 71, 541–544. <https://doi.org/10.2134/agronj1979.00021962007100040005x>
- Esper Neto, M., Coneglian, C.F., Costa, A.C.S., Inoue, T.T., Batista, M.A., 2019. Short-term effects of liming on chemical attributes of tropical sandy soil and soybean (*Glycine max* L.) yield. *Aust. J. Crop Sci.* 13, 889–894. <https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.06.p1614>
- Fageria, N.K., 2001a. Resposta de arroz de terras altas, feijão, milho e soja à saturação por base em solo de cerrado. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 5, 416–424. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662001000300009>
- Fageria, N.K., 2001b. Efeito da calagem na produção de arroz, feijão, milho e soja em solo de cerrado. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 36, 1419–1424. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2001001100013>
- Fageria, N.K., Baligar, V.C., 2008. Ameliorating Soil Acidity of Tropical Oxisols by Liming For Sustainable Crop Production. *Adv. Agron.* 99, 345–399. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)00407-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)00407-0)
- Fageria, N.K., Moreira, A., Moraes, L.A.C., Moraes, M.F., 2014. Influence of Lime and Gypsum on
- Fageria, N.K., Wright, R.J., Baligar, V.C., Carvalho, J.R.P., 1991. Response of upland rice and common bean to liming on an Oxisol, in: Wright, R.J., Baligar, V.C., Murrman, R.P. (Eds.), *Plant-Soil Interactions at Low PH*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 519–525. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-3438-5\\_58](https://doi.org/10.1007/978-94-011-3438-5_58)
- Friesen, D.K., Miller, M.H., Juo, A.S.R., 1980. Liming and Lime-Phosphorus-Zinc Interactions in Two Nigerian Ultisols: II. Effects on Maize Root and Shoot Growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 1227–1232. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400060019x>
- Gaiser, T., De Barros, I., Lange, F.M., Williams, J.R., 2004. Water use efficiency of a maize/cowpea intercrop on a highly acidic tropical soil as affected by liming and fertilizer application. *Plant Soil* 263, 165–171. <https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000047733.98854.9f>

- Gómez, R., Vicino, P., Carrillo, N., and Lodeyro, A. F. 2019. Manipulation of oxidative stress responses as a strategy to generate stress-tolerant crops. From damage to signaling to tolerance. *Crit. Rev. Biotechnol.* 39, 693–708. doi: 10.1080/07388551.2019.1597829
- Gonzalez-Erico, E., Kamprath, E.J., Naderman, G.C., Soares, W. V., 1979. Effect of Depth of Lime Incorporation on the Growth of Corn on an Oxisol of Central Brazil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43, 1155–1158. <https://doi.org/10.2136/sssaj1979.03615995004300060019x>
- Guarçoni, A., Sobreira, F.M., 2017. Classical methods and calculation algorithms for determining lime requirements. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 41, 1–11. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20160069>
- Haling, R.E., Simpson, R.J., Delhaize, E., Hocking, P.J., Richardson, A.E., 2010. Effect of lime on root growth, morphology and the rhizosheath of cereal seedlings growing in an acid soil. *Plant Soil* 327, 199–212. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0047-5>
- Harun, I.G., Benson, E.M., Benjamin, O.D., 2015. Effect of lime and goat manure on soil acidity and maize (*Zea mays*) growth parameters at Kavutiri, Embu County- Central Kenya. *J. Soil Sci. Environ. Manag.* 6, 275–283. <https://doi.org/10.5897/jssem15.0509>
- Ho, M.D., Rosas, J.C., Brown, K.M., Lynch, J.P., 2005. Root architectural tradeoffs for water and phosphorus acquisition. *Funct. Plant Biol.* 32, 737–748.
- Jorge, L.A.C., Silva, D.J.C.B., 2010. Safira: Manual de utilização. Embrapa Instrumentação.
- Keltjens, W.G., Dijkstra, W.J., 1991. The role of magnesium and calcium in alleviating aluminium toxicity in wheat plants, in: *Plant-Soil Interactions at Low PH*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 763–768. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-3438-5\\_86](https://doi.org/10.1007/978-94-011-3438-5_86)
- Keltjens, W.G., Tan, K., 1993. Interactions between aluminium, magnesium and calcium with different monocotyledonous and dicotyledonous plant species. *Plant Soil* 155–156, 485–488. <https://doi.org/10.1007/BF00025089>
- Kunhikrishnan, A., Thangarajan, R., Bolan, N.S., Xu, Y., Mandal, S., Gleeson, D.B., Seshadri, B., Zaman, M., Barton, L., Tang, C., Luo, J., Dalal, R., Ding, W., Kirkham, M.B., Naidu, R., 2016. Functional Relationships of Soil Acidification, Liming, and Greenhouse Gas Flux. *Adv. Agron.* 139, 1–71. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2016.05.001>
- Li, Y., Cui, S., Chang, S.X., Zhang, Q., 2019. Liming effects on soil pH and crop yield depend on lime material type, application method and rate, and crop species: a global meta-analysis. *J. Soils Sediments* 19, 1393–1406. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2120-2>
- Lilley, J.M., Kirkegaard, J.A., 2011. Benefits of increased soil exploration by wheat roots. *F. Crop. Res.* 122, 118–130. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.03.010>

- Lopes, A.S., Guilherme, L.R.G., 2016. A Career Perspective on Soil Management in the Cerrado Region of Brazil. *Adv. Agron.* 137, 1–72. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.12.004>
- Lynch, J.P., 2007. Roots of the Second Green Revolution. *Aust. J. Bot.* 55, 493–512.
- Miranda, L.N., Rowell, D.L., 1987. The effects of lime and phosphorus on the function of wheat roots in acid top soils and subsoils. *Plant Soil* 104, 253–262. <https://doi.org/10.1007/BF02372539>
- Moreira, S.G., 2019. Desafios para a sustentabilidade dos sistemas de produção com culturas anuais. *Informações Agronômicas* 4, 1–12.
- Nunes, M.R., Denardin, J.E., Vaz, C.M.P, Karlen, D.L., Cambardella, C.A., 2019. Lime movement through highly weathered soil profiles. *Environ. Res. Commun.* 1 115002. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab4eba>
- Qaswar, M., Dongchu, L., Jing, H., Tianfu, H., Ahmed, W., Abbas, M., Lu, Z., Jiangxue, D., Khan, Z.H., Ullah, S., Huimin, Z., Boren, W., 2020. Interaction of liming and long-term fertilization increased crop yield and phosphorus use efficiency (PUE) through mediating exchangeable cations in acidic soil under wheat–maize cropping system. *Sci. Rep.* 10, 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76892-8>
- R Development Core Team, 2019. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria.
- Ritchey, K. D., Feldhake, C. M., Clark, R. B., and Sousa, D. M. G., 1995. “Improved water and nutrient uptake from subsurface layers of gypsum-amended soils,” in *Agricultural Utilization of Urban and Industrial By-Products*, ed. D. L. Karlen (Madison: ASA), 157–181.
- Sade, H., Meriga, B., Surapu, V., Gadi, J., Sunita, M.S.L., Suravajhala, P., Kavi Kishor, P.B., 2016. Toxicity and tolerance of aluminum in plants: Tailoring plants to suit to acid soils. *BioMetals* 29, 187–210. <https://doi.org/10.1007/s10534-016-9910-z>
- Sanchez, P.A. 2019. *properties and Management of Soils In the Tropics*, second edition. Cambridge University Press, UK.
- Santos, D.R. dos, Tiecher, T., Gonzatto, R., Santanna, M.A., Brunetto, G., Silva, L.S. da, 2018. Long-term effect of surface and incorporated liming in the conversion of natural grassland to no-till system for grain production in a highly acidic sandy-loam Ultisol from South Brazilian Campos. *Soil Tillage Res.* 180, 222–231. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.03.014>
- Santos, H.G. dos, Jacomine, P.K.T., Anjos, L.H.C. dos, Oliveira, V.Á. de, Lumberras, J.F.,

- Coelho, M.R., Almeida, J.A. de, Araújo Filho, J.C. de, Oliveira, J.B. de, Cunha, T.J.F., 2018. Sistema brasileiro de classificação de solos, 5th ed. ed, Embrapa Solos. Brasília, DF.
- Silva, L.M. da, Lemos, L.B., Crusciol, C.A.C., Feltran, J.C., 2004. Sistema radicular de cultivares de feijão em resposta à calagem. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 39, 701–707. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000700012>
- Silva, F.C., 1999. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Embrapa Solos/Embrapa Informática Agropecuária.
- Soil Survey Staff, 2014. Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. ed, USDA Natural Resources Conservation Services. Washington, DC.
- Sousa, D.M.G., Lobato, E., 2004. Cerrado: Correção do solo e adubação. Embrapa Cerrados, Planaltina.
- Teixeira, W.G., Víctor Hugo Alvarez, V., Neves, J.C.L., 2020a. New methods for estimating lime requirement to attain desirable pH values in Brazilian soils. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 44. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200008>
- Teixeira, W.G., Víctor Hugo Alvarez, V., Neves, J.C.L., Paulucio, R.B., 2020b. Evaluation of traditional methods for estimating lime requirement in Brazilian soils. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 44. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200078>
- van Raij, B., 2011. Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. International Plant Nutrition Institute, Piracicaba.
- van Raij, B., Quaggio, J.A., da Silva, N.M., 1986. Extraction of phosphorus, potassium, calcium, and magnesium from soils by an ion-exchange resin procedure. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 17, 547–566. <https://doi.org/10.1080/00103628609367733>
- Victoria, O., Ping, A., Yang, S., Eneji, E., 2019. Liming and Nitrogen Effects on Maize Yield and Nitrogen Use Efficiency. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 50, 2041–2055. <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1648663>
- Wasson, A.P., Richards, R.A., Chatrath, R., Misra, S.C., Prasad, S.V.S., Rebetzke, G.J., Kirkegaard, J.A., Christopher, J., Watt, M., 2012. Traits and selection strategies to improve root systems and water uptake in water-limited wheat crops. *J. Exp. Bot.* 63, 3485–3498. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers111>

**ARTIGO 2 - EFEITO DE DOSES DE CALCÁRIO INCORPORADAS A 40 CM NA  
DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES E NA PRODUTIVIDADE DE CULTURAS  
ANUAIS**

**Artigo redigido conforme a NBR 6022 (ABNT, 2018) e formatado de acordo com o  
Manual da UFLA de apresentação de teses e dissertações.**

## RESUMO

A acidez do solo é o fator mais limitante para a produtividade e sustentabilidade agrícola em solos ácidos. A calagem é a prática de manejo recomendada para a redução da acidez do solo e aumento da disponibilidade de macronutrientes, mas pode provocar a redução da disponibilidade dos micronutrientes catiônicos, quando aplicada em doses elevadas. Objetivou-se com este estudo avaliar o efeito de doses de calcário, incorporadas na camada 0-40 cm, na disponibilidade de nutrientes e produtividade acumulada de grãos, num sistema de produção com culturas anuais. No ano de 2017, três experimentos foram implantados com cinco doses de calcário (0, 3, 6, 9, 12 e 15 Mg ha<sup>-1</sup>), incorporadas na camada 0-40 cm. Amostras de solo e de folha foram coletadas, para a determinação da concentração de macronutrientes e micronutrientes nas folhas. Também avaliou-se o efeito das doses de calcário na produtividade acumulada das culturas de soja, milho e feijão durante três anos. Análises de regressão e correlação linear foram utilizadas para avaliar o efeito das doses na disponibilidade de nutrientes e produtividade das culturas. A produtividade de grãos teve incremento quadrático, em função das doses de calcário, com a dose ótima entre 9 e 15 Mg ha<sup>-1</sup>, a depender do local. Os principais fatores que correlacionaram positivamente com a produtividade foram o pH do solo e a concentração de macronutrientes. O Fe foi o micronutriente que teve maior redução de disponibilidade no solo pela calagem, em contraponto, o Zn não foi afetado. A concentração dos micronutrientes, nas folhas de soja e feijão, foram mais sensíveis ao efeito da calagem profunda que os teores no solo, sendo observadas reduções nas concentrações de B, Fe, Mn e Zn, porém se mantendo no nível adequado. O micronutriente do solo mais afetado pela calagem profunda foi o Fe, e o menos afetado foi o Zn. No Local3, área com maior acidez inicial, houve a maior redução dos teores B e Cu do solo, com aumento das doses de calcário. Com o aumento do pH do solo, em função da aplicação de calcário, houve redução nas concentrações da maioria dos micronutrientes, nas folhas das culturas e aumento dos macronutrientes, além do incremento em produtividade acumulada de grãos.

Palavras-chave: pH do solo; micronutrientes; macronutrientes; calagem incorporada.



## 1 INTRODUÇÃO

85 % dos solos da América do Sul são ácidos (Fageria; Baligar, 2001; Uexküll; Mutert, 1995), sendo assim, a acidez do solo é o principal limitador de produtividade dos cultivos (Fageria; Baligar, 2008; Lopes; Guilherme, 2016). Portanto a correção da acidez do solo com a prática da calagem é o principal manejo do solo para o aumento de produtividade e sustentabilidade da produção agrícola em solos ácidos (Fageria; Baligar, 2001, 2008; Li *et al.*, 2019). A aplicação de calcário em solos ácidos promove redução da acidez do solo e da toxicidade de  $Al^{3+}$ ,  $Mn^{2+}$  e  $H^+$ ; melhoria da estrutura do solo (aeração) e a atividade biológica; aumento da disponibilidade de  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , P e Mo; incremento do valor de pH e da fixação biológica de N; podendo causar a redução da disponibilidade de  $Mn^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  e  $Fe^{2+}$ , além de perdas de cátions por lixiviação (Fageria; Baligar, 2008).

O efeito da calagem, na redução da acidez do solo e aumento da produtividade dos cultivos, depende da dose de calcário, método de aplicação, tipo de material corretivo e cultura agrícola (Li *et al.*, 2019). No Brasil, o consumo de calcário tem aumentado, de acordo com a Associação Brasileira dos Produtores de Calcário Agrícola (ABRACAL, 2022). Em 2021, foram utilizados 54.5 milhões de toneladas, valor aquém do ideal, pois as doses médias ainda estão pouco acima de  $600\text{ kg ha}^{-1}$ , ou seja, indicando o uso de subdoses de corretivo, especialmente, porque os métodos tradicionais de recomendação têm subestimados a real necessidade de calcário (Cantarella *et al.*, 2022; Fageria, N., 2001; Guarçoni; Sobreira, 2017; Teixeira; Alvarez; Neves, 2020; Teixeira *et al.*, 2020). Além disso, o método de aplicação depende do sistema de uso e manejo adotado. A aplicação superficial sem incorporação predomina em áreas sob sistema plantio direto (SPD) e com culturas perenes instaladas e pastagem. Por sua vez, a incorporação até a camada 0-0,20 m é feita em solos preparados de forma convencional ou durante a implantação do SPD ou culturas perenes. A correção da acidez do solo em subsuperfície é lenta com aplicação superficial sem incorporação (Caires, 2013; Caires *et al.*, 2005; Nunes *et al.*, 2019), bem como quando a incorporação de calcário é feita apenas até a camada de 0 a 0,20 m.

Estudos da década de 70 já mostravam que a incorporação profunda de doses corretas de calcário, em áreas de implantação de SPD, reduzia a acidez do solo e aumentava os teores de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  no perfil, com conseqüente incremento do crescimento radicular e da produtividade dos cultivos em Latossolos do Brasil (Doss; Dumas; Lund, 1979; Gonzalez-Erico *et al.*, 1979). Recentemente, Moraes *et al.* (2023) também demonstraram a importância da incorporação profunda de calcário, no aumento da resiliência das plantas à condição de veranico

e ao aumento de produtividade, pelo aumento do volume e quantidade de raízes em profundidade. Porém desconhecem-se estudos em longo prazo sobre o efeito doses de calcário incorporadas de forma profunda na disponibilidade de micronutrientes.

Estudos dessa natureza são importantes, pois é muito documentado na literatura que a elevação do pH provocado pela calagem causa a redução da disponibilidade de  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  e  $\text{Zn}^{2+}$  (Abreu; Lopes; Santos, 2007; Fageria; Baligar, 2008; Fageria; Stone, 2008). Inclusive essa preocupação com os micronutrientes foi um dos motivos para que, no passado recente, os mais importantes boletins práticos de recomendação de calagem e adubação do Brasil não recomendassem doses de calcário para elevar a saturação por bases do solo acima de 50 % (Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais - CFSEMG, 1999) e 70 % (Raij *et al.*, 1997). No entanto um estudo atual faz um alerta, para o uso do diagrama de disponibilidade de nutrientes x pH do solo, sem considerar os diversos outros fatores que interferem na disponibilidade de nutrientes (Hartemink; Barrow, 2023). Segundo os autores, os nutrientes interagem e as plantas respondem de maneira diferente às mudanças de pH, logo o pH do solo não pode ser usado isoladamente para prever a disponibilidade de nutrientes às plantas. Em áreas sob SPD diferentes, respostas têm sido observadas à aplicação de calcário, desde o aumento dos teores de Mn e Zn no solo, na camada superficial (Moreira *et al.*, 2006, 2016) e manutenção da absorção de Mn, Fe e Zn por aveia preta, quando se utilizaram altas doses de calcário (Soratto; Crusciol, 2008), até a redução da absorção de Mn e Zn pela soja (Caires *et al.*, 2003; Caires; Fonseca, 2000).

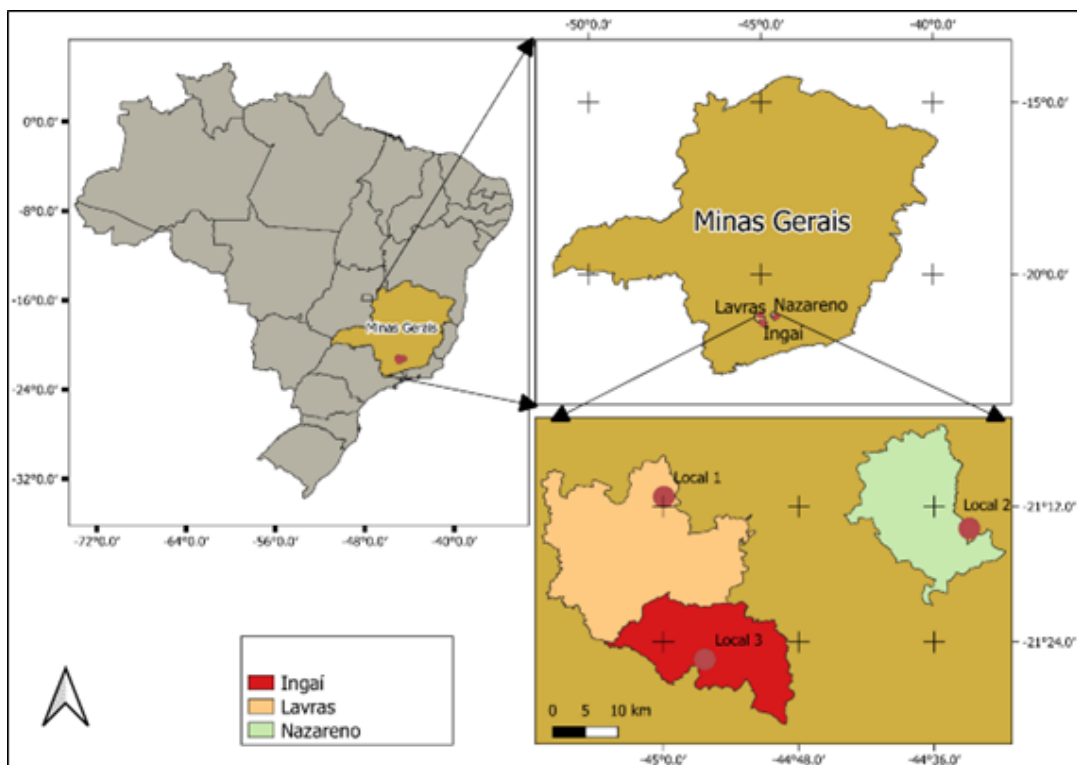
Diante disso, objetivou-se com este estudo avaliar o efeito de doses de calcário incorporadas, na camada 0-0,40 m, na disponibilidade de macro e micronutrientes pelas culturas, bem como a relação da disponibilidade de nutrientes com a produtividade acumulada de grãos durante três anos. As hipóteses deste estudo são que: 1) os teores micronutrientes no solo e a concentração de nutrientes nas folhas são reduzidos pelas altas doses de calcário, incorporadas de forma profunda; 2) embora possa haver redução da absorção dos micronutrientes pelas culturas, a produtividade acumulada de grãos é incrementada pelas doses de calcário incorporadas a 0,40 m de profundidade; e 3) a calagem profunda aumenta a absorção de macronutrientes pelas culturas.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Locais dos experimentos

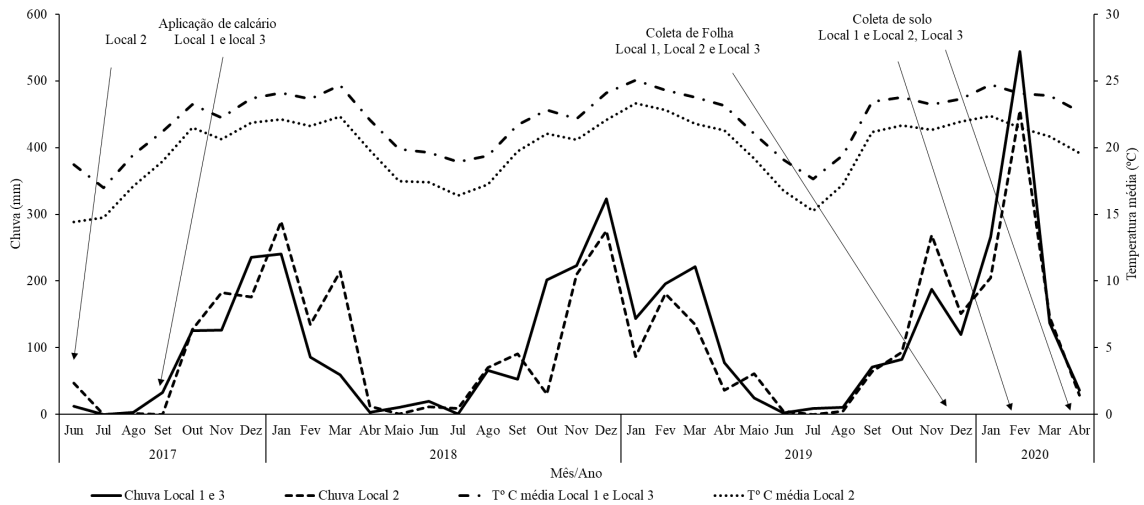
O estudo foi conduzido, em condições de campo, em três locais: Lavras (Local1), Nazareno (Local2) e Ingai (Local3), na mesorregião de Campo das Vertentes, Minas Gerais, Brasil (FIGURA1). Os solos das áreas experimentais foram classificados como LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO, argiloso, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos *et al.*, 2018) e Typic Hapludox, de acordo com a Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014). O clima da mesorregião é do tipo Cwa com inverno seco e frio e verão quente e úmido. A temperatura média do mês mais quente é de 30 °C e do mais frio, 11 °C. A precipitação, durante o período de estudo, pode ser observada na FIGURA 2.

Figura 1 - Localização das áreas onde foram conduzidos os experimentos



Fonte: Do autor (2023).

Figura 2 - Distribuição de chuva e temperatura média durante os três anos do estudo



Fonte: Do autor (2023).

Os experimentos foram conduzidos independentemente nos três locais. Antes de iniciar os experimentos, os solos foram cultivados com milho e pastagens extensivas. No entanto houve pouco uso de fertilizantes e corretivos nas áreas. Além disso, nenhuma atividade agrícola havia sido conduzida nesses solos por pelo menos dois anos. As características do calcário utilizado em cada local foram as seguintes: Local1: Poder relativo de neutralização total (PRNT) = 83 %, CaO = 44 % e MgO = 14 %; Local2: PRNT = 83 %, CaO = 35 % e MgO = 20 %; e Local3: PRNT= 77 %, CaO = 47 % e MgO = 14 %.

A caracterização física e química do solo foi realizada, antes do início do experimento, utilizando os métodos descritos por Silva (2009). As amostras de solo foram secas ao ar em temperatura ambiente, trituradas e peneiradas (<2 mm), para a obtenção da terra fina seca ao ar, que foi armazenada para posterior caracterização. As características físicas do solo são apresentadas na Tabela 1 e as características químicas, antes do início dos experimentos, na Tabela 2.

Tabela 1 - Conteúdos de areia, silte e argila e textura do solo por local e profundidade

Prof.	Areia	Silte	Argila	Classificação textural
cm	————— g kg <sup>-1</sup> —————			
	<b>Fazenda Muquém – Local 1</b>			
0-20	235	303	462	Argilosa
20-40	239	277	485	Argilosa
	<b>Fazenda Santa Helena – Local 2</b>			
0-20	251	208	541	Argilosa
20-40	232	197	571	Argilosa
	<b>Fazenda Muquém – Local 3</b>			
0-20	444	161	395	Argilosa
20-40	425	153	422	Argilosa

Fonte: Silva (2009).

Argila e silte (método da pipeta); areia (peneiramento).

Tabela 2 - Propriedades químicas do solo por local e profundidade antes do início do estudo.

Prof.	pH	P	K	Ca	Mg	H+Al	T	V	MO	B	Cu	Fe	Mn	Zn
cm	(H <sub>2</sub> O)	mg dm <sup>-3</sup>	————— cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> —————					%	g kg <sup>-1</sup>		————— mg dm <sup>-3</sup> —————			
<b>Local 1</b>														
0-20	5,7	3,4	0,3	3,7	0,9	4,2	9,1	54	33	0,1	1,1	56	56	1,3
20-40	5,9	2,1	0,2	3,4	0,8	3,2	7,6	58	-	-	-	-	-	-
<b>Local 2</b>														
0-20	5,7	1,7	0,1	1,4	0,5	2,7	4,7	42	26	0,6	3,5	41	25	0,4
20-40	5,7	0,8	0,1	1,1	0,7	2,4	4,3	44	-	-	-	-	-	-
<b>Local 3</b>														
0-20	5,2	2,8	0,1	1,4	0,8	7,2	9,5	24	33	0,2	1,0	25	6,3	0,8
20-40	5,2	2,3	0,1	0,9	0,4	4,0	5,4	25	-	-	-	-	-	-

Fonte: Do autor (2023).

pH - pH em água (1:2,5 solo/solução); MO - matéria orgânica do solo (Na<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 4 mol L<sup>-1</sup> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 5 mol L<sup>-1</sup>) (Silva, 2009); P e K resina mista (Raij; Quaggio; Silva, 1986); Fe, Zn, Mn e Cu (Silva, 2009); Ca, Mg e Al (KCl 1 mol L<sup>-1</sup>); S - Enxofre extraído como sulfato e o resultado foi convertido para S, (H+Al) - acidez potencial (SMP). CTC - capacidade de troca catiônica em pH 7,0 obtida adicionando Ca, Mg, K e H+Al; e saturação por bases [SB = ((Ca+Mg+K+H+Al)/CTC) × 100].

## 2.2 Delineamento experimental e condução dos experimentos no campo

Em cada local, os ensaios foram conduzidos, utilizando-se um delineamento de blocos casualizados, com seis tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos consistiram em seis doses de calcário (0, 3, 6, 9, 12 e 15 Mg ha<sup>-1</sup>), distribuídas por equipamento com distribuição gravitacional, Bruttus 6000 (Stara©), com uma faixa de aplicação de 4,37 m, a fim de se evitar perdas do calcário por deriva. Imediatamente após a aplicação, o calcário foi incorporado, na camada de solo de 0-0,40 m, com duas passadas de grade pesada (grade pesada Piccin© 14 × 32" - 14 discos de 32 polegadas), seguido de uma subsolagem (subsolador de cinco hastes Baldan©) e duas passadas de grade niveladora com discos leves (grade niveladora Baldan© com 20 discos de 26 polegadas - 270 mm). O tamanho de cada parcela foi de 8,74 × 30 m (262 m<sup>2</sup>).

Durante o estudo, o calcário foi aplicado apenas uma vez (ano de 2017). Após o primeiro ano, não houve mais revolvimento do solo e todas as culturas foram semeadas sob sistema plantio direto (SPD). A aplicação de diferentes doses de calcário foi realizada nas seguintes datas: 27/06/2017, 14/09/2017 e 20/09/2017 no Local2, Local1 e Local3, respectivamente. Após a incorporação do calcário, as culturas foram implantadas, durante as safras de 2017/18; 2018/19 e 2019/20 (Tabela 3) e todas as operações foram realizadas, de acordo com as práticas de manejo do produtor, incluindo escolha de cultivares e adubações, controle de pragas, manejo de plantas daninhas e doenças. As culturas cultivadas, durante o experimento, foram: soja (*Glycine max*), milho (*Zea mays*), feijão comum (*Phaseolus vulgaris*) e trigo (*Triticum spp.*).

Tabela 3 - Histórico das culturas, com cultivar, população, datas de realização das operações de semeadura, colheita e adubações nos três locais

Local	Ano	Cultura	Cultivar	População (sementes/ha)	Semeadura	Colheita	Adubo de semeadura	Dose (kg/ha)	Cobertura: KCl (kg/ha)	Cobertura: NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (kg/ha)
Local 1	2017/18	Soja	M 6410 IPRO	290.000	25/11/2017	12/04/2018	02:30:30	300	0	0
	2018/19	Soja	M 6410 IPRO	290.000	30/10/2018	19/02/2019	8:40:00:12.5 S	200	100	0
	2019/20	Soja	M5917IPRO	300.000	27/10/2019	19/02/2020	13:33:00	150	200	0
Local 2	2017/18	Soja	NS 7670 RR	280.000	15/11/2017	17/04/2018	08:40:00	200	250	0
	2018/19	Soja	NS 7670 RR	280.000	11/10/2018	31/03/2019	09:43:00	250	400	0
	2019/19	Trigo	BRS 264	4.000.000	18/04/2019	27/07/2019	11:54:00	200	0	150
	2019/20	Feijão	IPR Tuiuiu	240.000	11/05/2019	01/02/2020	13:33:00 S15	250	200	205
	2020/20	Miho/Brachiaria <sup>1</sup>	P3646	62.000	18/02/2020	12/07/2020	13:33:00	250	0	340
Local 3	2017/18	Feijão	Perola	206.000	28/01/2018	28/04/2018	09:43:00	200	200	272
	2018/19	Soja	SYN 13671 IPRO	280.000	13/11/2018	31/03/2019	11:54:00	200	200	0
	2019/19	Trigo	BRS 264	4.000.000	15/04/2019	27/07/2019	11:54:00	100	0	120
	2019/20	Soja	Foco IPRO	290.000	11/03/2019	18/03/2020	11:54:00	200	170	0
	2020/20	Trigo	BRS 264	4.000.000	20/04/2020	30/07/2020	11:54:00	100	0	120

Fonte: Do autor (2023).

<sup>1</sup> Brachiaria ruziziensis consorciada com milho, semeada no mesmo dia que o milho.



As culturas descritas na Tabela 3 foram semeadas a uma profundidade de 0,03-0,05 m, com deposição de fertilizantes de 0,10-0,12 m de profundidade, durante a semeadura, exceto para o trigo, em que a profundidade das sementes foi de 0,03 m e do fertilizante 0,06 m, pelas limitações da máquina. Para essa operação, foram usadas semeadoras de fertilizantes para SPD. No Local1, foi usada a semeadora Jumil® - modelo JM 2570, com 4 linhas; e, no Local2 e Local3, a semeadora Kuhn® - modelo PG 1000, com 10 linhas. Para o cultivo de inverno, foi usada a semeadora Prima®, modelo 4590, com 27 linhas utilizadas no Local2 e Local3. As operações de semeadura, nas culturas de primeira safra, foram realizadas 10-15 dias após a dessecação das plantas daninhas. As culturas da segunda safra (trigo e milho) foram semeadas imediatamente após a colheita das culturas da primeira safra. As culturas de segunda safra (trigo em abril e milho em fevereiro) foram cultivadas apenas no Local2 e Local3, no segundo (2018/19) e terceiro anos (2019/20) (TABELA 3).

A precipitação total acumulada no Local1 foi de 655, 1087 e 1045 mm durante as primeiras safras (outubro a fevereiro) de 2017/18, 2018/19 e 2019/20, respectivamente (FIGURA 2). Na primeira safra, foi registrada uma restrição hídrica de 16 dias, durante o enchimento de grãos da soja. A precipitação total, acumulada no Local2, durante as primeiras safras de 2017/18, 2018/19 e 2019/20, foram 954, 855 e 468 mm, respectivamente (FIGURA 2), não sendo observados períodos sem chuva durante o desenvolvimento das culturas na primeira safra. Na segunda safra 2018/19, no Local2, foram registrados 74 mm durante o ciclo do trigo. No entanto 69 mm foram registrados nos primeiros 29 dias. Assim, a maior restrição hídrica ocorreu durante o estágio reprodutivo da cultura. Na segunda safra de 2019/20, o acúmulo de precipitação, durante o cultivo de milho, foi de 300 mm. No entanto a maioria da precipitação ocorreu até 45 dias após a semeadura. Durante os 15 dias que precederam a floração da cultura, o acúmulo de precipitação foi de 16,5 mm. Após a floração, não foi registrada precipitação por 16 dias. Após esse período, até o estágio fenológico R4, o acúmulo de chuva foi de apenas 28,3 mm, permanecendo, assim, sem chuvas, até o estágio R6 (maturação fisiológica).

No Local3, o acúmulo de chuva, durante o ciclo de cada cultura, foi de 191, 1060 e 1047 mm, respectivamente, durante as safras 2017/18, 2018/19 e 2019/2020 (FIGURA 2). Na primeira safra, 18 dias após a floração, foi observado um acúmulo de 49,3 mm. Após esse período, a cultura passou por restrição hídrica até a colheita. A chuva registrada, durante o desenvolvimento do trigo, na segunda safra de 2018/19, foi de 49 mm, sendo 39 mm, acumulados entre os primeiros dias após a semeadura e parte durante a floração da cultura. Assim, durante o enchimento de grãos, houve pelo menos 30 dias sem chuva. Na segunda safra

de 2020, a chuva registrada foi de 26 mm, sendo 23 mm, em um único dia, durante a fase de floração, marcando assim um longo período de seca durante a fase de enchimento de grãos da cultura.

### **2.3 Amostragem de solo e folha**

As amostragens de solo (profundidades de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m) foram realizadas no mesmo dia da colheita da cultura de verão de cada local na safra 2019/2020. Cinco amostras simples por parcela foram coletadas e misturadas para formar uma amostra composta. Todas as amostras foram secas ao ar, moídas e passadas por uma peneira de 2 mm. Foram determinados os valores de pH e teores de B, Cu, Fe, Mn e Zn, seguindo-se os métodos descritos por Silva (2009). O pH do solo foi determinado em água (1: 2,5 solo/água). Os teores de Cu, Fe, Mn e Zn foram extraídos com solução Mehlich<sup>-1</sup> (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125 mol L<sup>-1</sup> e HCl 0,05 mol L<sup>-1</sup>) e B com água quente na proporção de 1:10 (v/v) solo/solução e determinados por espectroscopia de emissão de chama.

As folhas de soja e feijão foram coletadas, durante florescimento (estádio R1 a R2 para soja e R6 para feijão), em cada local na safra 2019/2020, sempre coletando-se o terceiro trifólio, com pecíolo, do ápice das plantas para baixo (Raij *et al.*, 1997). Para ambas as culturas, 10 trifólios foram coletados por parcela. Após a coleta, as amostras de folhas foram colocadas para secar em uma estufa a 65 °C até atingirem massa constante e foram moídas. Determinaram-se, nas amostras de folhas, as concentrações de N, P, K, S, Ca, Mg, Mn, Zn, B, Cu e Fe, de acordo com Malavolta, Vitti e Oliveira (1997).

### **2.4 Produtividade de grãos**

A produtividade de grãos foi determinada pela colheita de três linhas centrais de cinco metros de comprimento por parcela experimental. A umidade dos grãos foi padronizada para 13 % e para correção e cálculo da produtividade por área da parcela e, a partir desta, estimada a produtividade por hectare (10.000 m<sup>2</sup>).

### **2.5 Análises estatísticas**

Os micronutrientes do solo, macronutrientes e micronutrientes das folhas e a produção acumulada foram analisados com análise de variância e, quando houve efeito das doses de

calcário (tratamentos), uma análise de regressão foi realizada. A escolha do modelo foi baseada na significância dos parâmetros de ajuste, menor Critério de Informação de Akaike (AIC) e maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Foi realizada uma análise de correlação linear de Pearson entre a produtividade, o pH do solo, os micronutrientes do solo, os macronutrientes e micronutrientes nas folhas. Todas as análises e gráficos foram feitas com o software R versão 4.2.1 (R Core Team, 2022).

### 3 RESULTADOS

O ajuste das equações de regressão entre os teores de micronutrientes do solo (B, Cu, Fe, Mn e Zn), em função das doses de calcário incorporadas na camada 0-0,40 m, três anos após a implantação do experimento, é apresentado na Tabela 4. Entre os modelos polinomiais testados, o linear apresentou o melhor ajuste aos dados.

Em nenhum dos locais, os teores de Zn no solo foram modificados pelas doses de calcário, mas os teores de Fe foram os mais afetados, sendo alterados nos solos dos três locais. Por sua vez, os teores de B, Cu e Mn somente foram alterados no Local3 (TABELA 4).

Tabela 4 - Teores de micronutrientes no solo nos três locais, em função de doses de calcário incorporadas a 0,40 m de profundidade

Nutriente	Local	Dose de calcário (Mg ha <sup>-1</sup> )						Regressão	R <sup>2</sup>
		0	3	6	9	12	15		
mg dm <sup>-3</sup>									
B	Local1	0,33	0,21	0,31	0,18	0,28	0,30	ns	
	Local2	0,25	0,25	0,32	0,30	0,34	0,31	ns	
	Local3	0,26	0,21	0,16	0,21	0,18	0,15	$\hat{y} = 0,235 - 0,0055x$	0,58*
Cu	Local1	1,78	1,62	2,38	1,75	1,82	1,48	ns	
	Local2	6,08	5,30	6,12	5,68	5,78	5,52	ns	
	Local3	1,48	1,30	1,27	1,08	1,02	1,05	$\hat{y} = 1,43 - 0,03x$	0,89**
Fe	Local1	85,7	66,1	70,1	62,4	60,8	42,2	$\hat{y} = 81,2 - 2,25x$	0,71**
	Local2	42,0	39,0	36,9	39,8	34,7	35,1	$\hat{y} = 41,1 - 0,418x$	0,29*
	Local3	31,0	30,9	30,5	25,3	23,8	24,1	$\hat{y} = 32 - 0,581x$	0,84**
Mn	Local1	102	87,4	94,8	119	95,4	111	ns	
	Local2	36,3	34,2	35,2	42,9	46,1	32,4	ns	
	Local3	9,72	7,47	13,9	13,2	13,6	12,3	$\hat{y} = 9,71 + 0,287x$	0,69**
Zn	Local1	2,45	2,54	2,65	3,00	2,25	2,47	ns	
	Local2	0,43	0,55	0,48	0,50	0,50	0,63	ns	
	Local3	0,88	0,70	0,95	0,83	0,80	0,76	ns	

Fonte: Do autor (2023).

\* e \*\* = significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente. ns = não significativo.

As concentrações de micronutrientes, nas folhas (TABELA 5), foram mais sensíveis ao efeito das doses de calcário incorporadas na camada 0-0,40 m que os teores no solo (TABELA 4). Com exceção do Cu, as concentrações foliares de B, Fe, Mn e Zn da maioria dos locais

foram reduzidas com o aumento das doses de calcário. Em todos os locais, as concentrações de Mn e Zn, nas folhas das plantas cultivadas, nas parcelas que receberam as maiores doses de calcário, foram reduzidas comparadas às plantas das parcelas sem aplicação de corretivo. No caso do Fe, as concentrações do nutriente foram reduzidas com a aplicação das maiores doses nos locais 2 e 3. No caso do B, as reduções das concentrações com as doses de calcário ocorreram nos locais 1 e 3, ou seja, não houve uma correspondência entre o que foi observado no solo com o que se observou com as concentrações de micronutrientes nas folhas, em função das doses de calcário.

As concentrações foliares dos macronutrientes apresentaram geralmente aumento linear ou quadrático, em função das doses de calcário (TABELA 6), visto que o comportamento quadrático teve máximo entre as doses 8,6 e 10,5 Mg ha<sup>-1</sup>, a depender do nutriente. Nos locais com solo de acidez mais elevada (Local2 e Local3), a calagem incrementou as concentrações foliares de K, Ca, Mg e S, já que, no Local1, apenas o K e o P foram incrementados com as doses de corretivo. A concentração foliar de N, no feijão cultivado no Local2, teve incremento linear, enquanto na soja não houve efeito. O contrário foi observado para o P, em que a soja apresentou incremento linear nas concentrações foliares e o feijão não teve efeito (TABELA 6).

Tabela 5 - Concentrações foliares de micronutrientes em soja e feijão, em diferentes locais, em função de doses de calcário incorporadas a 0,40 m de profundidade

Nutriente	Cultura	Local	Dose de calcário (Mg ha <sup>-1</sup> )						Regressão	R <sup>2</sup>
			0	3	6	9	12	15		
			mg kg <sup>-1</sup>							
B	Soja	Local1	43,5	32,8	32,8	32,6	28,6	31,0	$\hat{y} = 41,9 - 2,2x + 0,099x^2$	0,83*
	Feijão	Local2	31,5	31,7	34,7	31,9	33,2	31,1	ns	
	Soja	Local3	40,6	37,8	37,8	35,3	35,1	32,1	$\hat{y} = 40,2 - 0,504x$	0,94**
Cu	Soja	Local1	10,6	11,3	11,3	12,0	12,8	11,0	ns	
	Feijão	Local2	270	312	342	307	353	323	$\hat{y} = 292 + 3,38x$	0,42*
	Soja	Local3	13,4	10,9	12,5	12,9	12,4	15,4	ns	
Fe	Soja	Local1	93,7	88,9	102	99,8	103	97,8	ns	
	Feijão	Local2	316	200	190	168	240	162	$\hat{y} = 292 - 21,8x + 1,03x^2$	0,58*
	Soja	Local3	100	84,3	92,1	83,3	88,5	92,0	$\hat{y} = 98 - 2,86x + 0,174x^2$	0,57*
Mn	Soja	Local1	95,1	76,0	77,1	85,0	78,5	85,5	$\hat{y} = 91,2 - 3,30x + 0,199x^2$	0,52*
	Feijão	Local2	170	142	78,0	119	128	74,9	$\hat{y} = 153 - 4,54x$	0,47*
	Soja	Local3	91,7	59,4	52,3	42,5	42,3	41,6	$\hat{y} = 88,3 - 8,49x + 0,368x^2$	0,96**
Zn	Soja	Local1	28,9	27,0	20,6	25,2	21,6	26,3	$\hat{y} = 29,5 - 1,51x + 0,0839x^2$	0,52*
	Feijão	Local2	30,7	32,1	22,7	15,8	17,4	14,1	$\hat{y} = 31,7 - 1,28x$	0,85**
	Soja	Local3	40,7	44,0	34,4	33,6	32,5	32,8	$\hat{y} = 41,7 - 0,711x$	0,69**

Fonte: Do autor (2023).

\* e \*\* = significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente. ns = não significativo.

Tabela 6 - Concentrações foliares de macronutrientes em soja e feijão, em diferentes locais, em função de doses de calcário incorporadas a 0,40 m de profundidade

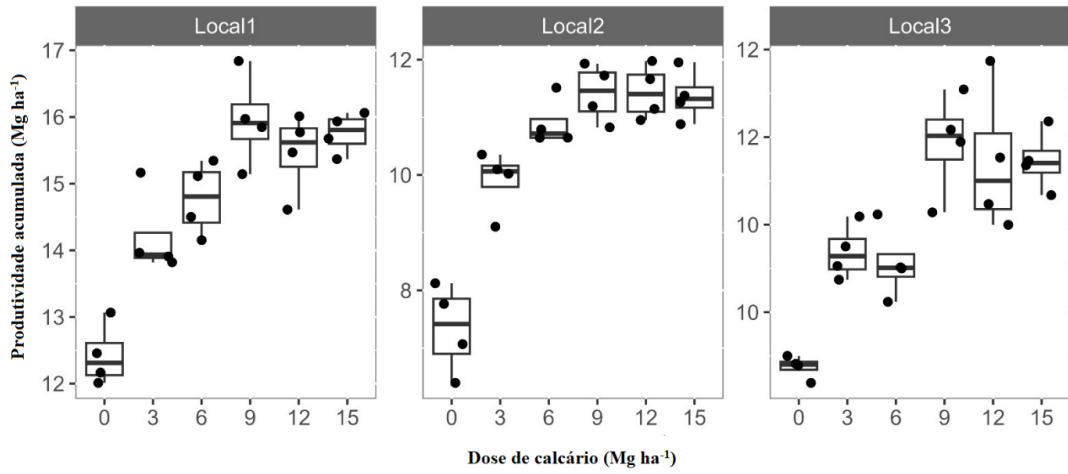
Nutriente	Cultura	Local	Doses de calcário (Mg ha <sup>-1</sup> )						Regressão	R <sup>2</sup>
			0	3	6	9	12	15		
			g kg <sup>-1</sup>							
N	Soja	Local1	38,2	41,7	37,1	40,8	38,7	41,8	ns	0,69**
	Feijão	Local2	28,8	34,4	32,4	42,4	41,0	39,5	$\hat{y} = 30,5 + 0,794x$	
	Soja	Local3	46,8	43,7	48,0	47,1	48,2	45,3	ns	
P	Soja	Local1	2,28	2,52	2,38	2,90	2,68	2,88	$\hat{y} = 2,32 + 0,0379x$	0,68**
	Feijão	Local2	3,12	3,10	3,18	3,25	3,25	3,18	ns	
	Soja	Local3	2,38	2,35	2,50	2,80	2,80	2,98	$\hat{y} = 2,30 + 0,0443x$	
K	Soja	Local1	22,8	23,0	26,3	24,0	25,4	23,5	$\hat{y} = 22,5 + 0,62x - 0,0359x^2$	0,51*
	Feijão	Local2	27,5	30,2	31,8	34,4	32,0	35,4	$\hat{y} = 28,5 + 0,455x$	
	Soja	Local3	26,8	26,2	28,4	28,1	28,9	31,6	$\hat{y} = 26,1 + 0,30x$	
S	Soja	Local1	3,60	3,47	3,60	4,00	3,52	3,70	ns	0,93**
	Feijão	Local2	3,55	3,97	4,35	4,32	4,60	4,25	$\hat{y} = 3,54 + 0,178x - 0,0085x^2$	
	Soja	Local3	3,03	3,12	3,25	3,48	3,20	3,22	$\hat{y} = 3,0 + 0,0726x - 0,0039x^2$	
Ca	Soja	Local1	13,4	13,0	13,4	13,6	13,4	13,5	ns	0,91*
	Feijão	Local2	14,7	16,4	19,0	21,0	20,4	17,7	$\hat{y} = 14,1 + 1,32x - 0,0693x^2$	
	Soja	Local3	7,47	8,48	9,39	9,55	10,1	11,1	$\hat{y} = 7,69 + 0,222x$	
Mg	Soja	Local1	4,15	4,00	4,13	4,77	4,13	4,20	ns	0,94**
	Feijão	Local2	3,90	5,00	5,82	5,98	6,60	5,65	$\hat{y} = 3,86 + 0,459x - 0,0219x^2$	
	Soja	Local3	3,18	3,20	3,38	3,60	3,42	3,52	$\hat{y} = 3,20 + 0,025x$	

Fonte: Do autor (2023).

\* e \*\* = significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente. ns = não significativo.

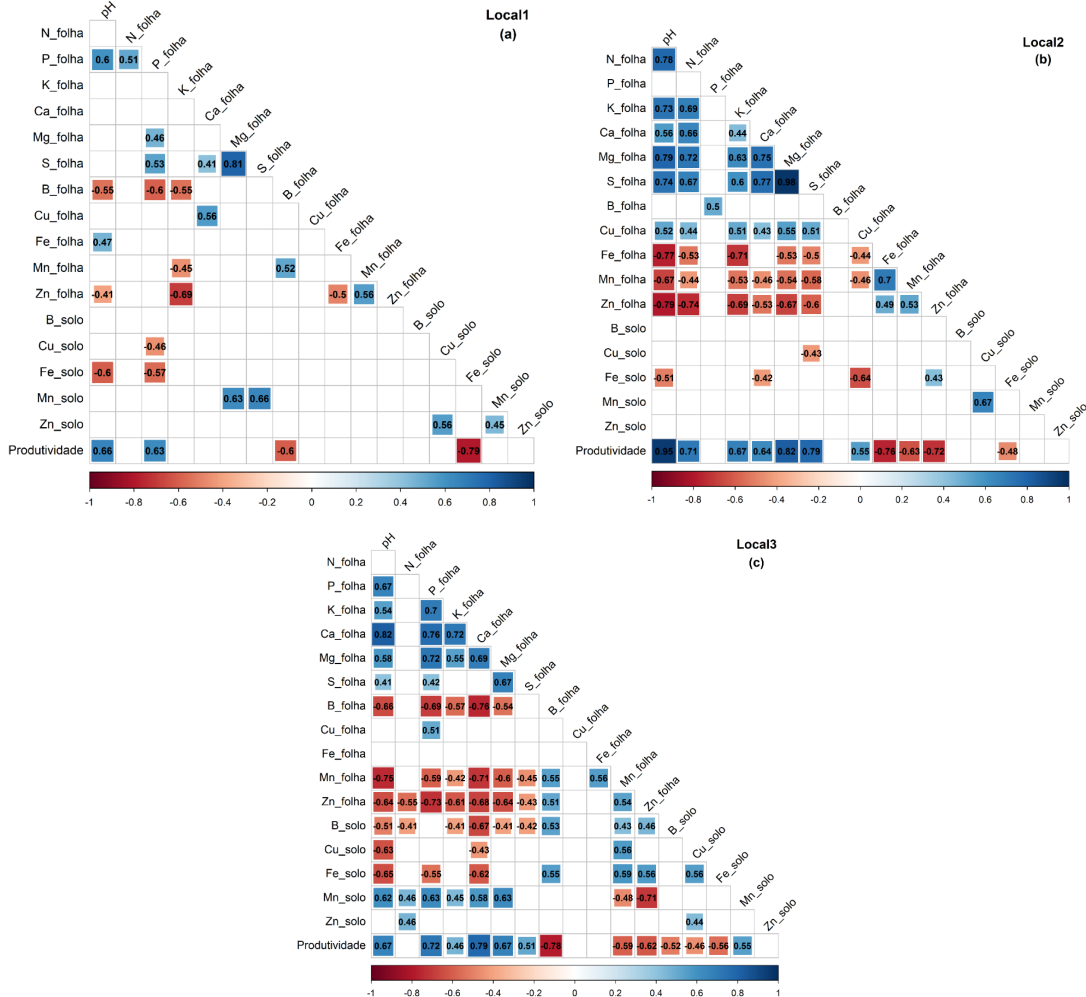
A calagem com incorporação profunda (0-0,40 m) incrementou a produtividade acumulada dos cultivos de primavera/verão nos três locais estudados (FIGURA 3). A dose ótima que promoveu as maiores produtividades acumuladas de grãos foi entre 9 a 15 Mg ha<sup>-1</sup>, a depender do local. O incremento da produtividade dos cultivos pelo calcário incorporado de forma profunda foi decorrente da redução da acidez do solo e aumento dos teores de Ca e Mg no perfil (0-0,40 m) (Moraes *et al.*, 2023), promovendo maior desenvolvimento e aprofundamento do sistema radicular, conforme já relatado na literatura (Fageria, N., 2001; Fageria; Baligar, 2008; Gonzalez-Erico *et al.*, 1979).

Figura 3 - Produtividade acumulada de grãos, durante três cultivos de primavera/verão, em três locais, em função de doses de calcário incorporadas 0-0,40 m.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 4 - Correlação de Pearson entre a produtividade dos cultivos, pH e micronutrientes do solo, e concentração foliar de macro e micronutrientes no Local1 (a), Local2 (b) e Local3 (c).



Fonte: Do autor (2023).

## 4 DISCUSSÃO

Os efeitos da aplicação de calcário em solos ácidos já são bem documentados, como redução da acidez do solo e da toxicidade de Al, Mn e H; melhoria da estrutura do solo (aeração); melhoria da disponibilidade de Ca, Mg, P e Mo; incremento do pH e da fixação biológica de N; e redução da disponibilidade de Mn, Zn, Cu e Fe e da perda de cátions por lixiviação (Fageria; Baligar, 2008). Portanto um ponto de atenção da aplicação de calcário seria a possível redução na disponibilidade de micronutrientes pelo aumento do pH do solo, por sua influência na solubilidade, concentração na solução do solo, forma iônica e mobilidade dos micronutrientes no solo (Fageria; Baligar; Clark, 2002; Hartemink; Barrow, 2023). Por outro lado, doses elevadas de calcário, principalmente incorporadas de forma profunda, em geral, provocam o aumento do pH e dos teores de macronutrientes no solo (Moraes *et al.*, 2023) e, como foi demonstrado no presente estudo, aumentam a disponibilidade de macronutrientes às plantas (TABELA 6) e a produtividade das culturas (FIGURA 3), mesmo com a redução na concentração de alguns micronutrientes nas folhas das culturas (TABELA 5).

Um fator importante, para manter alta produtividade das culturas, é que a concentração foliar dos nutrientes não fique abaixo dos valores considerados críticos. Assim, a possível redução da disponibilidade de micronutrientes não deve ser tratada como um obstáculo ao uso do calcário, para uma eficiente correção da acidez das camadas de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m, visto que a acidez do solo é um dos principais fatores limitadores da produtividade dos cultivos (Fageria; Baligar, 2008), ainda mais na América do Sul tropical, onde 85 % dos solos são ácidos (Fageria; Baligar, 2001; Uexküll; Mutert, 1995) e a fertilização com micronutrientes é facilitada pela menor demanda pelas plantas e há variadas opções de fornecimento, como solo, foliar e tratamento de sementes (Abreu; Lopes; Santos, 2007; Fageria; Baligar; Clark, 2002). Além disso, outros fatores também influenciam a disponibilidade de nutrientes no solo, como material de origem, matéria orgânica, textura, mineralogia, atividade biológica, cultura agrícola, interação entre nutrientes, potencial redox, temperatura e umidade do solo (Fageria; Baligar; Clark, 2002; Fageria; Stone, 2008; Hartemink; Barrow, 2023). Os nutrientes interagem e as plantas respondem de maneira diferente à mudança de pH, logo o pH do solo não pode ser usado unicamente, para prever a disponibilidade de nutrientes às plantas, pois sofre de inúmeras exceções e quase não representa regras (Hartemink; Barrow, 2023). Também deve ser ressaltado que grande parte dos solos do Brasil já possuem baixos teores originais de micronutrientes (Lopes; Guimarães, 2016), independentemente da calagem.



O Fe foi o micronutriente do solo mais afetado pelo aumento do pH do solo, conforme já observado em outros estudos (Fageria; Baligar; Clark, 2002; Fageria; Baligar; Wright, 1990). Além disso, houve correlação negativa entre os teores do nutriente no solo com as doses de calcário, independentemente do local de estudo (FIGURA 4). Ou seja, os teores foram reduzidos com o aumento das doses, o que já era esperado, pois observa-se que o  $\text{Fe}^{2+}$  reduz sua disponibilidade com o aumento do pH (Colombo *et al.*, 2014), dado que o  $\text{Fe}^{2+}$  é mais sensível ao aumento do pH que os demais micronutrientes catiônicos  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  e  $\text{Zn}^{2+}$ . Estima-se que, com o aumento de uma unidade de pH, a disponibilidade do nutriente pode ser reduzida em até 1000 vezes (Lindsay, 1979). Apesar disso, de forma geral, não tem havido grandes preocupações com a redução dos teores de  $\text{Fe}^{2+}$ , na maioria dos solos argilosos tropicais, pois eles têm naturalmente elevados teores totais de Fe (Silva *et al.*, 2020), os quais podem ser solubilizados por diferentes mecanismos e fornecer o nutriente às plantas (Colombo *et al.*, 2014). Assim, deficiências desse micronutriente são raras (Fageria; Stone, 2008), na maioria dos solos brasileiros, com exceção daqueles com material de origem pobre em Fe (Silva *et al.*, 2020) e os calcários (Marschner; Römheld, 1994), pouco comuns nas condições tropicais.

As deficiências de micronutrientes, em culturas anuais em solos da América do Sul, são comuns principalmente por Zn, Cu, B, Mn e, por último, Fe (Fageria; Stone, 2008). Pensando-se, na interpretação dos teores de Fe no solo, de acordo com as classes de teores para fertilidade do solo (CFSEMG, 1999), as doses de calcário alteraram o teor de Fe no solo (extrator Mehlich 1) da classe de interpretação “teor *Alto*” ( $> 45 \text{ mg dm}^{-3}$ ) para “teor *Adequado*” ( $31\text{-}45 \text{ mg dm}^{-3}$ ) no Local1, sem alteração de classe no Local2, mantendo-se como “teor *Adequado*” e alteraram os teores de “teor *Adequado*” para “teor *Médio*” ( $19\text{-}30 \text{ mg dm}^{-3}$ ) no Local3 (TABELA 4). Como os teores de Fe no solo não atingiram níveis baixos, mesmo com doses de até  $15 \text{ Mg ha}^{-1}$ , é de se esperar que as concentrações foliares se mantenham dentro de valores adequados.

As concentrações de Fe, nas folhas de soja cultivadas no Local1, não foram modificadas pelas doses de calcário (TABELA 5), conforme ocorreram com os teores do nutriente no solo (TABELA 4). Por outro lado, as concentrações de Fe, nas folhas de feijão (Local2) e soja (Local3), tiveram um comportamento quadrático decrescente, em função das doses de calcário, mas não houve mudança na classe de interpretação, em função das doses, ficando a concentração foliar do nutriente, na faixa adequada para soja ( $50\text{-}350 \text{ mg kg}^{-1}$ ), no Local1 e Local3 e, acima do adequado para feijão ( $40\text{-}140 \text{ mg kg}^{-1}$ ), no Local2 (Cantarella *et al.*, 2022) (TABELA 5). Possivelmente essa manutenção de alta disponibilidade de  $\text{Fe}^{2+}$ , mesmo em condições de valores de pH próximos de 7,0 ocorreu por se tratar de Latossolos argilosos

naturalmente com altos teores totais do nutriente (Colombo *et al.*, 2014), fato que não seria esperado, em solos com menor percentagem de argila, formados a partir de materiais de origem com baixos teores totais de Fe, como os Neossolos Quartzarênicos (Silva *et al.*, 2020).

Os teores de Zn no solo não foram afetados pela aplicação das doses de calcário, independentemente do local (Tabela 4) e também não apresentaram correlação com o pH do solo (FIGURA 4), os quais foram aumentados pelas doses de calcário (Moraes *et al.*, 2023). Caires *et al.* (2009) também não encontraram efeito da calagem nos teores de Zn do solo avaliados por diferentes extratores. Pensando-se, na interpretação dos teores de Zn no solo (CFSEMG, 1999), os teores se mantiveram na classe de interpretação “teor *Alto*” ( $> 2,2 \text{ mg dm}^{-3}$ ) no Local 1, mas geralmente na classe de disponibilidade baixa ( $0,5\text{-}0,9 \text{ mg dm}^{-3}$ ), nos locais 2 e 3 (Tabela 4). Assim, independentemente das doses de calcário utilizadas, é de se esperar baixa concentração de Zn nas folhas das culturas.

Apesar de os teores de Zn no solo de todos os locais não terem sido afetados pela aplicação das doses de calcário (TABELA 4), as concentrações de Zn, nas folhas de soja (Local1 e Local3) e feijão (Local2), foram reduzidas com o aumento das doses de calcário (TABELA 5). Apesar da redução, as concentrações de Zn nas folhas se mantiveram dentro da faixa de teores adequados para soja ( $20\text{-}50 \text{ mg kg}^{-1}$ ), no Local1 e Local3, porém abaixo do adequado para feijão ( $18\text{-}30 \text{ mg kg}^{-1}$ ) no Local2 (Cantarella *et al.*, 2022). De forma semelhante ao observado neste estudo, vem sendo relatada falta de variação nos teores de Zn do solo, em função da calagem (Caires *et al.*, 2009), porém redução na concentração foliar do nutriente (Caires *et al.*, 2009; Caires; Fonseca, 2000). Esses resultados demonstram a ineficiência dos extratores para Zn, utilizados no Brasil, para prever a disponibilidade do micronutriente, após aplicação de calcário (Abreu; Lopes; Santos, 2007; Caires *et al.*, 2009; Fonseca; Caires; Barth, 2010), corroborada pela alta correlação negativa do pH com a concentração foliar de Zn e correlação nula entre os valores de pH com os teores no solo (FIGURA 4). O extrator adequado, para avaliar os teores de Zn do solo, deveria detectar a alteração na sua disponibilidade, diante das mudanças de pH e, principalmente, correlação com a concentração nas folhas (Abreu; Lopes; Santos, 2007). Assim, há necessidade de novos estudos, para a definição da melhor maneira de se avaliar os teores de Zn nos solos brasileiros, porque 85% dos solos, na América do Sul, são ácidos (Fageria; Baligar, 2001; Uexküll; Mutert, 1995) e mais de 90% dos solos da região central do Brasil apresentam baixos teores de Zn (Lopes; Guimarães, 2016). Pelo fato de esses solos, também apresentarem, elevada acidez necessitam da aplicação de calcário, para a sua redução, bem como para aumentar a disponibilidade de nutrientes (Fageria; Baligar, 2008; Moraes *et al.*, 2023).

Os teores de B, Cu e Mn do solo foram modificados pela calagem apenas no Local3, havendo decréscimo de B e Cu pela aplicação de doses de calcário e aumento dos teores de Mn (TABELA 4). Os aumentos dos teores de Mn no solo, provocados pelas maiores doses de calcário, não eram esperados, uma vez que, de forma geral, a disponibilidade dos micronutrientes é reduzida pelo aumento de pH, provocado pelas doses de calcário. As maiores doses de calcário ( $\geq 9 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) aumentaram os valores de pH (água), nos solos de todos os locais (Moraes *et al.*, 2023), acima dos valores de 6,5, considerados adequados para solos sob Cerrados (CFSEMG, 1999). Os valores de pH (água) ficaram acima de 7,0 nos solos dos locais 1 e 3 e acima de 6,8 no Local 2. Tais fatos demonstram que o pH do solo não pode ser usado isoladamente para prever a disponibilidade de alguns micronutrientes às plantas (Hartemink; Barrow, 2023). Especificamente em relação ao Mn, extraído por extratores ácidos, têm sido relatados na literatura maiores teores de Mn, nas camadas superficiais do solo cultivados sob SPD que nas camadas inferiores (Fonseca; Caires; Barth, 2010; Moreira *et al.*, 2006, 2016, 2017). Esses maiores teores de Mn, nas camadas superficiais dos solos, têm sido mais relacionados com os maiores teores de MO que com os valores de pH dos solos, mas, muitas vezes, sem correlação entre os teores no solo com as concentrações do nutriente nas folhas (Moreira; Moraes; Navroski, 2017).

De maneira menos intensa que o Cu, o Mn parece associar-se com ligantes orgânicos (Dhaliwal *et al.*, 2019; Moreira *et al.*, 2006, 2016) e reduzir sua disponibilidade às plantas, assim como pode ser adsorvido aos argilominerais como caulinita e óxidos de Fe, especialmente, com aumento do pH (Abreu; Lopes; Santos, 2007). Como a correlação entre os teores de Mn no solo e o pH do solo foi positiva e a correlação entre os teores de Mn no solo e a concentração foliar foi negativa (FIGURA 4), o extrator utilizado para extração do Mn no solo também não foi eficiente, como observado para a avaliação do Zn, sugerindo a necessidade de novos estudos, para a definição de metodologias, para melhor avaliação da disponibilidade do Mn. Por outro lado, como a correlação entre concentração foliar de Mn e o pH do solo foi negativa (FIGURA 4), pode-se afirmar que o aumento do pH provocado pela calagem reduziu a disponibilidade do Mn às plantas. Mesmo com a redução da disponibilidade, as concentrações de Mn nas folhas de soja e feijão ainda se mantiveram bem acima dos valores adequados (CFSEMG, 1999), mesmo com doses de calcário de até  $15 \text{ Mg ha}^{-1}$  incorporadas a 0 a 0,40 m de profundidade.

A calagem pode aumentar a adsorção de B, nos coloides do solo, especialmente nos hidróxidos de Fe e Al, porém outros fatores também influenciam, como concentração de B, tempo de contato, textura e teor de MO (Dhaliwal *et al.*, 2019; Rosolem; Bíscaro, 2007; Soares;

Casagrande; Alleoni, 2008), justificando as diferenças entre locais. Também deve-se destacar que há aumento da adsorção de B aos ácidos húmicos e fúlvicos da MO com o aumento do pH (Dhaliwal *et al.*, 2019) e, entre os locais estudados, o solo do Local3 foi o que apresentou o menor valor inicial de pH ( $pH_{H_2O} = 5,2$ ), com a maior variação de pH com a aplicação das maiores doses de calcário, atingindo pH por volta de 7,0 na camada de 0 a 20 cm (Moraes *et al.*, 2023). Portanto isso que pode justificar por que teve as maiores reduções, nos teores de B e Cu, com as doses de calcário. Inclusive, houve correlação negativa entre os teores de B e Cu, no solo do Local3, com os valores de pH (FIGURA 4). A elevação do pH pode precipitar o  $Al^{3+}$  para forma de  $Al(OH)_3$ , que tem alta capacidade de adsorção de B, reduzindo sua disponibilidade (Abreu; Lopes; Santos, 2007; Rosolem; Biscaro, 2007; Soares; Casagrande; Alleoni, 2008). Apesar da redução do teor de B no solo pela calagem no Local3, a classe de interpretação não foi alterada, continuando “teor *Baixo*” ( $0,16-0,35 \text{ mg dm}^{-3}$ ), inclusive para os demais locais (CFSEMG, 1999). A calagem reduziu a concentração de B, nas folhas de soja (Locais 1 e 3), porém as concentrações se mantiveram na faixa considerada adequada ( $21-55 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Para o feijão, a calagem não alterou as concentrações foliares de B, que mantiveram acima da adequada ( $15-26 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (Cantarella *et al.*, 2022). O teor de B no solo teve correlação negativa com o pH apenas no Local3, já a concentração de B nas folhas teve correlação negativa com o pH apenas no Local2 (FIGURA 4).

O Cu, por sua vez, é micronutriente que possui maior força de adsorção aos colóides orgânicos e inorgânicos do solo (Dhaliwal *et al.*, 2019), com os complexos orgânicos de Cu exercendo papel importante tanto na mobilidade como na sua disponibilidade às plantas (Abreu; Lopes; Santos, 2007; Dhaliwal *et al.*, 2019). A calagem reduz a fração de Cu trocável e o ligado à MO, além de aumentar a adsorção do nutriente à fração inorgânica, especialmente nos óxidos de Fe e Mn, pelo aumento das cargas dependentes de pH (Nascimento *et al.*, 2007; Nascimento; Fontes; Melicio, 2003). Esse comportamento explica a redução da disponibilidade de Cu, no solo do Local3 (TABELA 4), em função do aumento do pH provocado pelas doses de calcário  $\geq 9 \text{ Mg ha}^{-1}$  (Moraes *et al.*, 2023). Além disso, houve correlação negativa entre os teores de Cu do solo com o pH (FIGURA 4). Doses de calcário reduziram os teores de Cu do solo do Local3 de adequado para médio (CFSEMG, 1999), o que possivelmente afetará a concentração de nutrientes nas folhas das culturas. Por sua vez, doses de calcário de até  $15 \text{ Mg ha}^{-1}$  não reduziram os teores de Cu dos solos dos locais 1 e 2, os quais continuaram altos e adequados no solo, respectivamente. Entretanto não houve redução da concentração foliar de Cu na soja, no Local1 e Local3 e, em contraponto, houve incremento da concentração do nutriente nas folhas do feijão no Local2. Os teores foliares de Cu na soja foram considerados adequados (10-

30 mg kg<sup>-1</sup>) e muito acima do adequado no feijão (4-6 mg kg<sup>-1</sup>) (Cantarella *et al.*, 2022), possivelmente, pelo elevado teor de Cu no solo (CFSEMG, 1999). O pH teve correlação positiva com as concentrações de Cu foliar no Local2 (FIGURA 4).

Quanto às concentrações foliares dos macronutrientes, principalmente nos locais com solo de acidez mais elevada (locais 2 e 3), a calagem incrementou as concentrações foliares de K, Ca, Mg e S, conforme foi observado por Quaggio, Mascarenhas e Bataglia (1982) e Raij *et al.* (1977) em soja, pela aplicação de doses de calcário incorporado ou por Caires e Fonseca (2000), com aplicação de calcário apenas na superfície. A concentração foliar de N no feijão cultivado no Local2 teve incremento linear, enquanto na soja não houve efeito. O contrário foi observado para o P, em que a soja apresentou incremento linear nas concentrações foliares e o feijão não teve efeito (TABELA 6). No Local1, apenas as concentrações de K e o P tiveram incremento com as doses de calcário e possivelmente as concentrações de Ca e Mg nas folhas não foram alteradas pelas doses de calcário pelo fato de os teores no solo já serem adequados (TABELA 2). Assim, de modo geral, o efeito da calagem na disponibilidade dos macronutrientes foi dependente da condição inicial de fertilidade do solo e da cultura, no entanto alguns padrões foram observados. Nos solos com valores de pH inicial mais baixos (Local2 e Local3), houve correlação positiva entre pH e os teores de Ca, Mg e K nas folhas (FIGURA 4b e 4c). A interação entre os cátions Ca, Mg e K é bem conhecida, podendo ser sinérgica ou antagônica (Marschner, 2012). Baixo teor de Ca no solo afeta negativamente as membranas plasmáticas das células radiculares, levando ao vazamento de íons e absorção deficiente de nutrientes (Gransee; Führs, 2013). Teores adequados de Ca no solo restaura a funcionalidade da membrana, de modo que a absorção de Mg e K é aumentada e o vazamento reduzido (Fageria, V., 2001; Gransee; Führs, 2013; Marschner, 2012). No entanto o excesso de Ca transforma o efeito sinérgico dos nutrientes em uma competição catiônica antagônica pela absorção, refletindo em redução na absorção de Mg e K pelas plantas (Gransee; Führs, 2013). Portanto as doses de calcário utilizadas neste estudo não causaram aumento excessivo nos teores de Ca do solo que pudessem prejudicar a absorção de Mg e K, ainda mais que o calcário utilizado também tinha concentração de MgO superior a 14%.

O teor de Mg nas folhas teve forte correlação positiva com o teor de S nas folhas, não sendo relatado na literatura interação entre esses dois nutrientes (Rietra *et al.*, 2017), podendo ser um efeito indireto da calagem no aumento da mineralização da MO, convertendo S orgânico em sulfato (Silva *et al.*, 1999; Wainwright, 1984). O teor de Zn nas folhas teve forte correlação negativa com o teor de K nas folhas, também não sendo relatado na literatura esse tipo de interação. O efeito do pH no teor de Zn nas folhas foi negativo, já no teor de K nas folhas foi

positivo, evidenciando não uma interação entre K e Zn, mas efeito inverso da calagem na disponibilidade dos dois nutrientes. Em contraponto, o teor de Zn nas folhas teve correlação positiva com o teor de Mn nas folhas, possivelmente pelo efeito similar da calagem na disponibilidade de Zn e Mn no solo, já que se tem verificado efeito antagônico entre esses micronutrientes (Rietra *et al.*, 2017).

A produtividade acumulada de grãos teve correlação positiva com o pH do solo, em todos os locais, mostrando a importância da correção da acidez para o aumento de produtividade dos cultivos em solos ácidos (Bossolani *et al.*, 2022; Caires, 2013; Caires *et al.*, 2008; Fageria, N., 2001; Fageria; Baligar, 2001, 2008; Fageria; Stone, 2008). Exceto no Local1, que já apresentava menor acidez e teores adequados de Ca, Mg e K, o pH teve correlação positiva com Ca, Mg, K e S na folha (FIGURA 4). No Local2, o pH também teve correlação positiva com o N na folha e no Local3 teve correlação positiva com P na folha. Tais resultados demonstram o efeito da correção da acidez na melhoria da fertilidade do solo e nutrição com macronutrientes pelas plantas. Embora tenham sido observadas reduções, nos teores de alguns micronutrientes no solo, como o Fe nos solos de todos os locais; Cu e B no solo do Local3 e reduções nas concentrações de Zn nas folhas de todos os locais; Mn nas folhas, nos locais 2 e 3 e B nas folhas nos locais 1 e 3, as reduções ocorridas nos teores de micronutrientes não foram suficientes para provocar reduções nas produtividades das culturas. Dessa forma, neste estudo, os teores de micronutrientes no solo e nas folhas tiveram correlação negativa com a produtividade dos cultivos, com exceção do Cu nas folhas do Local 2 e Mn no solo para o Local 3, com correlação positiva.

Nos locais 2 e 3, a produtividade dos cultivos teve forte correlação positiva com as concentrações de macronutrientes nas folhas, especialmente Ca, Mg, K e S (FIGURA 4). Esses resultados mostram que a calagem não só melhora a nutrição das plantas pelo fornecimento de Ca e Mg do calcário, mas também aumenta a disponibilidade de nutrientes que não são fornecidos pelo corretivo, como o K, S, P e N (Fageria; Baligar, 2008). Por isso, o aumento da eficiência das adubações passa pela adequada correção da acidez do solo (Fageria; Baligar, 2001, 2008).

## 5 CONCLUSÕES

O micronutriente do solo mais afetado pela calagem profunda foi o Fe, e o menos afetado foi o Zn, o qual não foi afetado pelas doses de calcário. O Local3 com maior acidez inicial do solo teve maior redução dos teores B e Cu do solo, com aumento das doses de calcário.

As concentrações de micronutrientes nas folhas de soja e feijão foram mais sensíveis ao efeito da calagem profunda que os teores no solo, sendo observadas reduções nas concentrações foliares de B, Fe, Mn e Zn, porém se mantendo dentro do nível adequado às plantas.

O aumento do pH do solo, em decorrência da calagem profunda, reduziu as concentrações da maioria dos micronutrientes nas folhas das culturas e aumentou os macronutrientes, além de ter aumentado a produtividade acumulada de grãos.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, C. A.; LOPES, A. S.; SANTOS, G. C. G. Micronutrientes. *In*: NOVAIS, R. F. *et al.* (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 645-736.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE CALCÁRIO AGRÍCOLA. **Consumo de calcário no Brasil**: período de 1992/2021. Rio Claro: Abracal, 2022.
- BOSSOLANI, J. W. *et al.* Improving soil fertility with lime and phosphogypsum enhances soybean yield and physiological characteristics. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, v. 42, n. 6, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00765-9>.
- CAIRES, E. F. Correção da acidez do solo em sistema plantio direto. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n. 141, p. 1-13, mar. 2013.
- 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, MG, v. 27, n. 2, p. 275-286, abr. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000200008>.
- CAIRES, E. F. *et al.* Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. **European Journal of Agronomy**, London, v. 28, p. 57-64, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.05.002>.
- CAIRES, E. F. *et al.* Surface application of lime for crop grain production under a no-till system. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, n. 3, p. 791-798, May 2005. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2004.0207>.
- CAIRES, E. F. *et al.* Surface liming and zinc availability in a long-term experiment under no-till system. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 40, n. 17/18, p. 2898-2911, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103620903173871>.
- CAIRES, E. F.; FONSECA, A. F. da. Absorção de nutrientes pela soja cultivada no sistema de plantio direto em função da calagem na superfície. **Bragantia**, Campinas, v. 59, n. 2, p. 213-220, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052000000200013>.
- CANTARELLA, H. *et al.* (ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2022. (Boletim, 100).
- COLOMBO, C. *et al.* Review on iron availability in soil: interaction of Fe minerals, plants, and microbes. **Journal of Soils and Sediments**, New York, v. 14, p. 538-548, 2014.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999.



DHALIWAL, S. S. *et al.* Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: a review. **Environmental and Sustainability Indicators**, Coimbra, v. 1/2, Sept. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indic.2019.100007>.

DOSS, B. D.; DUMAS, W. T.; LUND, Z. F. Depth of lime incorporation for correction of subsoil acidity 1. **Agronomy Journal**, Madison, v. 71, n. 4, p. 541-544, July/Aug. 1979. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj1979.00021962007100040005x>.

FAGERIA, N. K. Efeito da calagem na produção de arroz, feijão, milho e soja em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, n. 11, p. 1419-1424, nov. 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2001001100013>.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Ameliorating soil acidity of tropical oxisols by liming for sustainable crop production. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 99, p. 345-399, 2008.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Improving nutrient use efficiency of annual crops in Brazilian acid soils for sustainable crop production. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 32, n. 7/8, p. 1303-1319, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1081/CSS-100104114>.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; CLARK, R. B. Micronutrients in crop production. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 77, p. 185-268, 2002.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; WRIGHT, R. J. Iron nutrition of plants: an overview on the chemistry and physiology of its deficiency and toxicity. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 25, p. 553-570, 1990.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F. Micronutrient deficiency problems in South America. *In*: ALLOWAY, B. J. (ed.). **Micronutrient deficiencies in global crop production**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008. p. 245-266.

FAGERIA, V. D. Nutrient interactions in crop plants. **Journal of Plant Nutrition**, Monticello, v. 24, n. 8, p. 1269-1290, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1081/PLN-100106981>.

FONSECA, A. F. da; CAIRES, E. F.; BARTH, G. Extraction methods and availability of micronutrients for wheat under a no-till system with a surface application of lime. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, n. 1, p. 60-70, Feb. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162010000100009>.

GONZALEZ-ERICO, E. *et al.* Effect of depth of lime incorporation on the growth of corn on an oxisol of Central Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Fayetteville, v. 43, n. 6, p. 1155-1158, Nov./Dec. 1979. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1979.03615995004300060019x>.

GRANSEE, A.; FÜHRS, H. Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. **Plant and Soil**, The Hague, v. 368, p. 5-21, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1567-y>.

- GUARÇONI, A.; SOBREIRA, F. M. Classical methods and calculation algorithms for determining lime requirements. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v. 41, p. 1-11, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20160069>.
- HARTEMINK, A. E.; BARROW, N. J. Soil pH - nutrient relationships: the diagram. **Plant and Soil**, The Hague, v. 486, p. 209-215, Jan. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05861-z>.
- LI, Y. *et al.* Liming effects on soil pH and crop yield depend on lime material type, application method and rate, and crop species: a global meta-analysis. **Journal of Soils and Sediments**, New York, v. 19, p. 1393-1406, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2120-2>.
- LINDSAY, W. L. **Chemical equilibrium in soils**. New York: John Wiley, 1979.
- LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. A career perspective on soil management in the cerrado region of Brazil. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 137, p. 1-72, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.12.004>.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Potafos, 1997.
- MARSCHNER, H.; RÖMHELD, V. Strategies of plants for acquisition of iron. **Plant and Soil**, The Hague, v. 165, p. 261-274, June 1994. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00008069>.
- MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants**. 3<sup>rd</sup> ed. London: Elsevier, 2012.
- MORAES, F. A. *et al.* Lime incorporation up to 40 cm deep increases root growth and crop yield in highly weathered tropical soils. **European Journal of Agronomy**, London, v. 144, p. 126763, Mar. 2023.
- MOREIRA, A.; MORAES, L. A. C.; NAVROSKI, D. Lime and micronutrients interaction in soybean genotypes adapted to tropical and subtropical conditions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, London, v. 48, n. 7, p. 792-800, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1298790>.
- MOREIRA, S. G. *et al.* Chemical forms in soil and availability of manganese and zinc to soybean in soil under different tillage systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 163, p. 41-53, Nov. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.05.007>.
- MOREIRA, S. G. *et al.* Efeito da calagem na disponibilidade de micronutrientes para soja, cultivada em solo sob diferentes tempos de cultivo em plantio direto. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 39, n. 1, p. 89-97, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v39i1.30691>.
- MOREIRA, S. G. *et al.* Formas químicas, disponibilidade de manganês e produtividade de soja em solos sob semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 1, p. 121-136, fev. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000100013>.

- NASCIMENTO, C. W. A. do *et al.* Effect of liming on the plant availability and distribution of zinc and copper among soil fractions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, London, v. 38, n. 3/4, p. 545-560, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103620601174643>.
- NASCIMENTO, C. W. A. do; FONTES, R. L. F.; MELICIO, A. C. F. D. Copper availability as related to soil copper fractions in oxisols under liming. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, p. 167-173, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162003000100025>.
- NUNES, M. R. *et al.* Lime movement through highly weathered soil profiles. **Environmental Research Communications**, Bristol, v. 1, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab4eba>.
- QUAGGIO, J. A.; MASCARENHAS, H. A. A.; BATAGLIA, O. C. Resposta da soja à aplicação de doses crescentes de calcário em Latossolo Roxo distrófico de cerrado: II., efeito residual. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v. 6, p. 113-118, 1982.
- R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Viena: R Foundation for Statistical Computing, 2022.
- RAIJ, B. van *et al.* Efeito de níveis de calagem na produção de soja em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v. 1, p. 28-31, 1977.
- RAIJ, B. van *et al.* **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. rev. Campinas: IAC, 1997.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; SILVA, N. M. Extraction of phosphorus, potassium, calcium, and magnesium from soils by an ion-exchange resin procedure. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 17, p. 547-566, 1986. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103628609367733>.
- RIETRA, R. P. J. J. *et al.* Effects of nutrient antagonism and synergism on yield and fertilizer use efficiency. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, London, v. 48, n. 16, p. 1895-1920, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1407429>.
- ROSOLEM, C. A.; BÍSCARO, T. Adsorção e lixiviação de boro em Latossolo Vermelho-Amarelo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 42, n. 10, p. 1473-1478, out. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007001000015>.
- SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- SILVA, C. A. *et al.* Mineralização de nitrogênio e enxofre em solos brasileiros sob influência da calagem e fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 34, n. 9, p. 1679-1689, set. 1999. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000900019>.
- SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, DF: Embrapa Solos; Embrapa Informática Agropecuária, 2009.

SILVA, L. S. *et al.* Spatial variability of iron oxides in soils from Brazilian sandstone and basalt. **Catena**, Amsterdam, v. 185, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104258>.

SOARES, M. R.; CASAGRANDE, J. C.; ALLEONI, L. R. F. Adsorção de boro em solos ácidos em função da variação do pH. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p. 111-120, fev. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100011>.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12<sup>th</sup> ed. Washington, DC: Soil Survey Staff, 2014.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Atributos químicos do solo decorrentes da aplicação em superfície de calcário e gesso em sistema plantio direto recém-implantado. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 2, p. 675-688, abr. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200022>.

TEIXEIRA, W. G.; ALVAREZ, V. V. H.; NEVES, J. C. L. New methods for estimating lime requirement to attain desirable pH values in Brazilian soils. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v. 44, 2020. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20200008>.

TEIXEIRA, W. G. *et al.* Evaluation of traditional methods for estimating lime requirement in Brazilian soils. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v. 44, 2020. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20200078>.

UEXKÜLL, H. R. von; MUTERT, E. Global extent, development and economic impact of acid soils. **Plant and Soil**, The Hague, v. 171, p. 1-15, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00009558>.

WAINWRIGHT, M. Sulfur oxidation in soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 37, p. 349-396, 1984. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60458-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60458-7).

**ARTIGO 3 - RELAÇÃO ENTRE DOSES DE CALCÁRIO INCORPORADAS A 40  
CM, PARTICIPAÇÃO DE CÁLCIO E MAGNÉSIO NA CTC DO SOLO E  
PRODUTIVIDADE DE GRÃOS**

**Artigo redigido conforme a NBR 6022 (ABNT, 2018) e formatado de acordo com o  
Manual da UFLA de apresentação de teses e dissertações.**

## RESUMO

Os solos brasileiros, em sua maioria, apresentam restrições para os principais cultivos do país, em função da elevada acidez do solo e dos baixos teores de nutrientes. Quando essa acidez não é adequadamente corrigida, há impedimento no desenvolvimento satisfatório das plantas, com redução do potencial produtivo das culturas. A calagem é um dos pilares, para se aumentar a produção agrícola, principalmente, quando as doses de corretivo são incorporadas de forma profunda no solo. No entanto, atualmente, ainda há dúvidas sobre como calcular as doses de calcário para incorporação profunda. Diante disso, objetivou-se com este estudo avaliar o efeito de doses de calcário, incorporadas na camada 0-40 cm, na produtividade de grãos, bem como correlacionar a produtividade relativa dos cultivos com a participação de Ca e Mg na CTC potencial do solo, a fim de se buscar um índice adequado para cálculo das doses de calcário para os sistemas de produção de grãos. Portanto foram conduzidos dois experimentos com diferentes doses de calcário (0, 3, 6, 9, 12 e 15 Mg ha<sup>-1</sup>), incorporadas na camada 0-40 cm, durante quatro anos. Os tratamentos foram dispostos em blocos ao acaso com quatro repetições. Foram realizadas amostragens de solo e aferição da produtividade, durante os quatro anos de estudos, em seis cultivos por local. Houve incremento significativo na produtividade dos cultivos e melhoria da fertilidade do solo com as doses calcário. O rendimento equivalente a 95% da produtividade relativa foi obtido com doses de 6,7 (Local 1) e 8,3 Mg ha<sup>-1</sup> (Local 2) de calcário. A aplicação de calcário elevou o pH (H<sub>2</sub>O) do solo da camada de 0 a 20 cm para valores próximos a 7,0, sem perdas de produtividade. As doses de calcário entre 7 e 9 Mg ha<sup>-1</sup> foram suficientes para a obtenção de 95% da produtividade relativa de grãos. Avaliando os dados de produtividade de todos os cultivos nos três locais, obtiveram-se 95% da produtividade relativa de grãos, quando 55 e 26% (camada de 0-20 cm) e 35 e 17% (camada de 20-40 cm) da CTC potencial estavam ocupadas com Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>, respectivamente. Isso equivale a dizer que 95% da produtividade relativa de grãos foi obtida, quando a participação de Ca+Mg atingiu 81 (camada de 0-20 cm) e 52% (camada de 20-40 cm). Dessa forma, esses valores podem ser utilizados como parâmetros, para cálculos de doses de calcário, em áreas para implantação de sistemas de cultivos com culturas anuais.

Palavras-chave: calagem incorporada; saturação de cálcio; saturação de magnésio; CTC potencial.

## 1 INTRODUÇÃO

A maioria dos solos do país apresenta limitações para o cultivo de grãos pela alta acidez, que pode estar associada à toxicidade elevada de  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  e  $\text{H}^+$ , ou seja, a acidez do solo é o principal fator impeditivo para o aumento da produtividade dos cultivos (Fageria; Baligar, 2008; Lopes; Guilherme, 2016). Como o Brasil é um país tropical e que tem como característica a alta pluviosidade, com má distribuição das chuvas, ao longo do ano, os efeitos da falta de construção da fertilidade do solo podem ser mais danosos aos cultivos.

A calagem representa um grande marco, para a expansão da área cultivada no Cerrado, que é o segundo maior bioma do país e cada vez mais tem sido mais explorado pela agricultura. Os solos possuem boas propriedades físicas, com topografia adequada para a mecanização, porém apresentam-se altamente intemperizados, com baixos teores de nutrientes e com alta acidez. A necessidade de calagem refere-se à quantidade de calcário suficiente para neutralizar a acidez do solo e fornecer  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  para o sistema (Fageria; Baligar, 2008; Kunhikrishnan *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2019; Moraes *et al.*, 2023). Dessa forma, o uso de calcário é o principal manejo do solo para o aumento de produtividade em solos ácidos (Fageria; Baligar, 2001, 2008; Li *et al.*, 2019).

O sistema de produção de grãos tem buscado cada vez mais cultivares que apresentam alto potencial produtivo associado à precocidade, para que seja possível viabilizar duas safras por ano no modelo de cultivo sem irrigação. No entanto são cada vez mais comuns períodos de estiagem, principalmente durante os cultivos de outono/inverno. Nesse sistema, a preocupação sempre foi corrigir a camada de 0-20 cm do solo (Alvarez; Ribeiro, 1999; Raij, 2011; Raij *et al.*, 1996). Porém, com as incertezas climáticas, a correção do solo em profundidade, visando à camada de 0-40 cm, é uma excelente estratégia para minimizar os danos da escassez hídrica (Moraes *et al.*, 2023). Há resultados atuais e outros de mais de 40 anos atrás que mostram que o aprofundamento do sistema radicular das culturas tem permitido maior resiliência às plantas, para suportar os déficits hídricos, pois possibilitam maior acesso à água e nutrientes em profundidade (Doss; Dumas; Lund, 1979; Gonzalez-Erico *et al.*, 1979; Ho *et al.*, 2005; Lilley; Kirkegaard, 2011; Lynch, 2007; Moraes *et al.*, 2023; Wasson *et al.*, 2012).

A correção do solo, na camada de 0-40 cm, permite melhor desenvolvimento do sistema radicular, porém há uma grande dúvida entre os profissionais e produtores sobre qual o valor adequado de participação de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  na CTC pH 7,0 que permite o desenvolvimento

adequado dos cultivos. Estudos sobre a relação entre percentagem adequada de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  na CTC e produtividade de grãos são raros. Kamprath (1984) sugeriu uma saturação por Ca na faixa de 25-30% da CTC pH 7,0. Por outro lado, Camberato (1999) recomendou que a saturação por Mg na CTC pH 7,0 seja maior que 10%. Fageria, V. (2001) estipulou que, para a camada de 0-20 cm, a saturação por  $\text{Ca}^{2+}$  adequada era de 40%, enquanto a de  $\text{Mg}^{2+}$  de 17%. Para a camada de 20-40 cm, os valores estipulados foram de 36 e 16% para  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , respectivamente. A recomendação atual é que deve ser atingida uma saturação por bases de 70% na camada de 0-20 cm para a soja, milho, feijão e trigo (Cantarella *et al.*, 2022; Wutke *et al.*, 2022), sendo necessário garantir no mínimo  $0,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  de  $\text{Mg}^{2+}$  na camada de 0-20 cm.

No campo têm sido observadas altas produtividades de grãos em glebas cujos solos apresentam valores de V% superiores a 80%, na camada de 0 a 20 cm, com participações de Ca e Mg na CTC potencial entre 40-60 e 15-20%, respectivamente. Diante disso, a hipótese do presente estudo é que, para se obter 95% da produtividade relativa de grãos, nos atuais sistemas de produção, deve-se ter uma participação de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  na CTC potencial mínima de 80%, na camada de 0 a 20 cm e, pelo menos, 50% na camada de 20 a 40 cm. Diante disso, objetivou-se avaliar o efeito de doses de calcário, incorporadas na camada 0-40 cm na produtividade de grãos, bem como correlacionar a produtividade relativa dos cultivos com a participação de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  na CTC do solo, a fim de se buscar um índice adequado para cálculo das doses de calcário para os sistemas de produção de grãos.

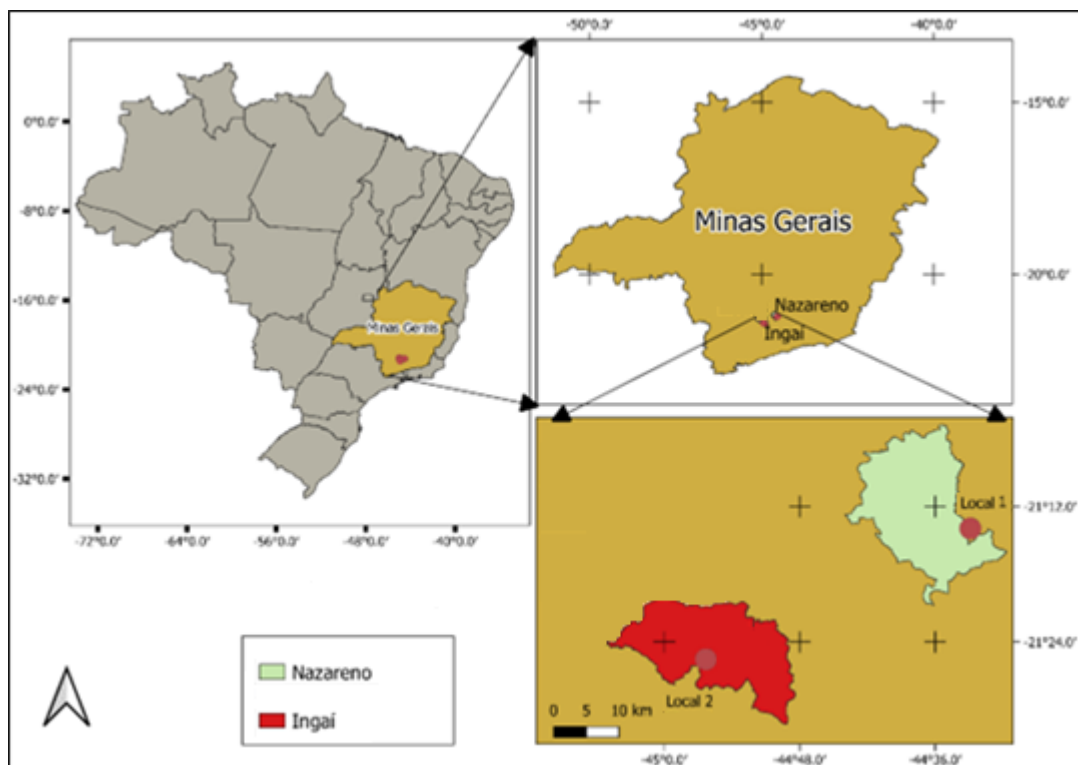


## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Locais dos experimentos

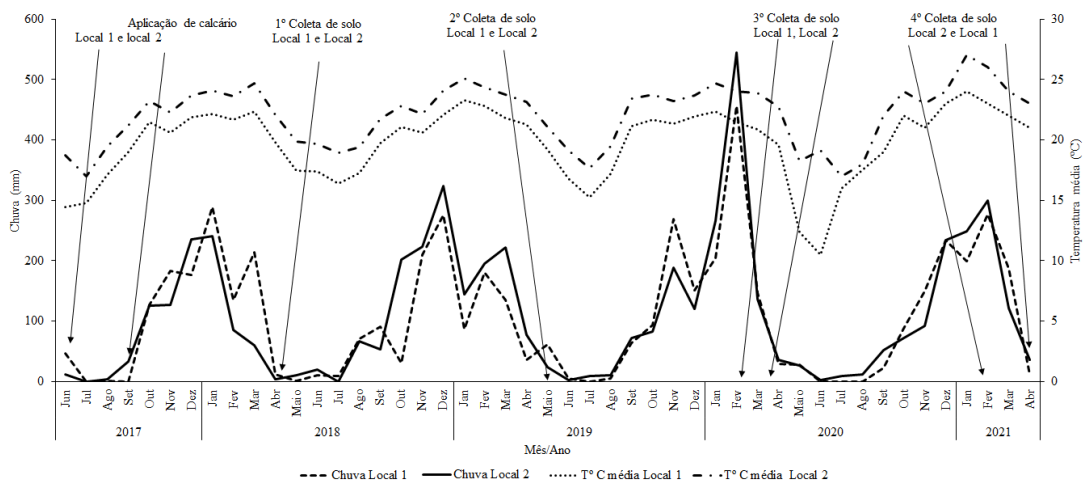
O estudo foi conduzido em condições de campo em dois locais: Nazareno (Local1) e Ingai (Local2), na mesorregião de Campo das Vertentes, Minas Gerais, Brasil (FIGURA 1). Os solos das áreas experimentais foram classificados como LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO argiloso, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos *et al.*, 2018) e Typic Hapludox de acordo com a Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014). O clima da mesorregião é do tipo Cwa com inverno seco e frio e verão quente e úmido. A temperatura média do mês mais quente é de 30 °C e, do mais frio, 11 °C. A precipitação, durante o período de estudo, pode ser observada na FIGURA 2.

Figura 1 - Localização das áreas onde foram conduzidos os experimentos



Fonte: Do autor (2023).

Figura 2 - Distribuição de chuva e temperatura média durante os três anos do estudo



Fonte: Do autor (2023).

Os experimentos foram conduzidos independentemente nos dois locais. Antes de iniciar os experimentos, os solos foram cultivados com milho e pastagens extensivas. No entanto houve pouco uso de fertilizantes e corretivos nas áreas. Além disso, nenhuma atividade agrícola havia sido conduzida nesses solos por pelo menos dois anos. As características do calcário utilizado em cada local foram as seguintes: Local1: Poder relativo de neutralização total (PRNT) = 83%, CaO = 35% e MgO = 20%; e Local2: PRNT= 77 %, CaO = 47 % e MgO = 14 %.

A caracterização física e química do solo foi realizada, antes do início do experimento, utilizando os métodos descritos por Silva e Silva (2009). As amostras de solo foram secas ao ar, em temperatura ambiente, trituradas e peneiradas (<2 mm), para a obtenção da terra fina seca ao ar, que foi armazenada para posterior caracterização. As características físicas do solo são apresentadas na Tabela 1 e as características químicas antes do início dos experimentos na Tabela 2.

Tabela 1 - Conteúdos de areia, silte e argila e textura do solo por local e profundidade

Prof.	Areia	Silte	Argila	Classificação textural
cm	————— g kg <sup>-1</sup> —————			
	<b>Fazenda Santa Helena (Local 1)</b>			
0-20	251	208	541	Argilosa
20-40	232	197	571	Argilosa
	<b>Fazenda Ingai (Local 2)</b>			
0-20	444	161	395	Argilosa
20-40	425	153	422	Argilosa

Fonte: Silva e Silva (2009).

Argila e silte (método da pipeta); areia (peneiramento).

Tabela 2 - Propriedades químicas do solo por local e profundidade antes do início do estudo.

Prof.	pH	P	K	Ca	Mg	H+Al	T	V	MO	B	Cu	Fe	Mn	Zn
cm	(CaCl <sub>2</sub> )	mg dm <sup>-3</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>			%		g kg <sup>-1</sup>	mg dm <sup>-3</sup>					
<b>Local 1</b>														
0-20	5,1	1,7	0,1	1,4	0,5	2,7	4,7	42	26	0,6	3,5	41	25	0,4
20-40	5,1	0,8	0,1	1,1	0,7	2,4	4,3	44	-	-	-	-	-	-
<b>Local 2</b>														
0-20	4,6	2,8	0,1	1,4	0,8	7,2	9,5	24	33	0,2	1,0	25	6,3	0,8
20-40	4,6	2,3	0,1	0,9	0,4	4,0	5,4	25	-	-	-	-	-	-

Fonte: Do autor (2023).

pH - pH em água (1:2,5 solo/solução); MO - matéria orgânica do solo ( $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  4 mol L<sup>-1</sup> +  $\text{H}_2\text{SO}_4$  5 mol L<sup>-1</sup>) (Silva; Silva, 2009); P e K resina mista (Raij; Quaggio; Silva, 1986); Fe, Zn, Mn e Cu (Silva; Silva, 2009); Ca, Mg e Al (KCl 1 mol L<sup>-1</sup>); S - Enxofre extraído como sulfato e o resultado foi convertido para S, (H+Al) - acidez potencial (SMP). CTC - capacidade de troca catiônica em pH 7,0 obtida adicionando Ca, Mg, K e H+Al; e saturação por bases [SB = ((Ca+Mg+K+H+Al)/CTC)) × 100].

## 2.2 Delineamento experimental e condução dos experimentos no campo

Em cada local, os ensaios foram conduzidos utilizando um delineamento de blocos casualizados com seis tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos consistiram em seis doses de calcário (0, 3, 6, 9, 12 e 15 Mg ha<sup>-1</sup>) aplicadas, utilizando-se o equipamento de distribuição por gravidade, Bruttus 6000 (Stara©), com uma faixa de aplicação de 4,37 m. Em vez de realizar uma aplicação superficial e realizar sua incorporação até 20 cm, como é frequentemente recomendado no Brasil (Alvarez; Ribeiro, 1999; Cantarella *et al.*, 2022), as doses de calcário foram incorporadas até 40 cm de profundidade. Após a aplicação na superfície, o calcário foi incorporado à camada de solo de 0-40 cm com duas passadas de grade pesada (grade pesada Piccin© 14 × 32" - 14 discos de 32 polegadas), seguido de subsolagem (subsolador de 5 hastes Baldan©) e duas passadas de grade niveladora com discos leves (grade niveladora Baldan© com 20 discos de 26 polegadas - 270 mm). O tamanho de cada parcela foi de 8,74 × 30 m (262 m<sup>2</sup>).

Durante o estudo, o calcário foi aplicado apenas uma vez (ano de 2017). A aplicação de diferentes doses de calcário foi realizada nas seguintes datas: 27/06/2017 e 20/09/2017, no Local1 e Local2, respectivamente. Após a incorporação do calcário, as culturas foram plantadas, durante a safra 2017/2018 (de outubro a fevereiro) e todas as operações foram realizadas, de acordo com as práticas de manejo do produtor, incluindo escolha de cultivares e adubações (TABELA 3), controle de pragas, manejo de ervas daninhas e doenças. As culturas cultivadas, durante o experimento, foram: soja (*Glycine max*), milho (*Zea mays*), feijão comum

(*Phaseolus vulgaris*) e trigo (*Triticum* spp.). Não foi aplicado gesso na área durante a condução do experimento.

Tabela 3 - Histórico de culturas e adubação nos três locais

Local	Ano	Cultura	Cultivar	População (sementes/ha)	Plantio	Colheita	Adubo de semeadura	Dose (kg ha <sup>-1</sup> )	Cobertura: KCl (kg ha <sup>-1</sup> )	Cobertura: NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )
Local1	2017/18	Soja	NS 7670 RR	280.000	15/11/2017	17/04/2018	8h40min	200	250	0
	2018/19	Soja	NS 7670 RR	280.000	11/10/2018	31/03/2019	9h43min	250	400	0
	2019/19	Trigo	BRS 264	4.000.000	18/04/2019	27/07/2019	11h54min	200	0	150
	2019/20	Feijão	IPR Tuiuiú	240.000	11/05/2019	01/02/2020	13h S15	250	200	205
	2020/20	Miho/Brachiaria <sup>1</sup>	P3646	62.000	18/02/2020	12/07/2020	13h33min	250	0	340
	2020/21	Soja	Desafio RR	240.000	20/11/2020	12/04/2021	11h54min	200	150	
Local2	2017/18	Feijão	Perola	206.000	28/01/2018	28/04/2018	9h43min	200	200	272
	2018/19	Soja	SYN 13671 IPRO	280.000	13/11/2018	31/03/2019	11h54min	200	200	0
	2019/19	Trigo	BRS 264	4.000.000	15/04/2019	27/07/2019	11h54min	100	0	120
	2019/20	Soja	Foco IPRO	290.000	11/03/2019	18/03/2020	11h54min	200	170	0
	2020/20	Trigo	BRS 264	4.000.000	20/04/2020	30/07/2020	11h54min	100	0	120
	2020/21	Milho	DKB 230 PRO3	78.000	10/10/2020	11/02/2021	13h33min	300	150	400

Fonte: Do autor (2023).

<sup>1</sup> Brachiaria ruziziensis consorciada com milho, semeada no mesmo dia que o milho.

O sistema de produção de cada local do estudo foi determinado pelos agricultores. Após o primeiro ano, não houve mais revolvimento do solo e todas as culturas foram semeadas sob sistema plantio direto (SPD). As culturas descritas na Tabela 3 foram semeadas a uma profundidade de 3 a 5 cm, com deposição de fertilizantes de plantio a 10-12 cm de profundidade, exceto para o trigo, em que a profundidade das sementes foi de 3 cm e do fertilizante 6 cm, pelas limitações da máquina. Para esta operação, foram usadas semeadoras de fertilizantes para SPD. Utilizou-se a semeadora Kuhn® - modelo PG 1000, com 10 linhas. Para a semeadura de trigo, foi utilizada a semeadora Prima® modelo 4590, com 27 linhas. As operações de semeadura, nas culturas de primeira safra, foram realizadas 10-15 dias após a dessecação das plantas daninhas. As culturas da segunda safra (trigo e milho) foram semeadas imediatamente após a colheita das culturas da primeira safra.

No Local1, nas culturas de primeira safra, não foram observados períodos sem chuva durante o desenvolvimento das culturas. O acúmulo total de precipitação, durante as primeiras safras de 2017/18, 2018/19, 2019/20 e 2020/2021, foram 954, 855, 468 e 1192 mm, respectivamente (Figura 2). Na segunda safra 2018/19, no Local1, foram registrados apenas 74 mm durante o ciclo do trigo. No entanto 69 mm foram registrados nos primeiros 29 dias. Assim, a maior restrição hídrica ocorreu durante o estágio reprodutivo da cultura. Na segunda safra de 2019/20, o acúmulo de precipitação, durante o cultivo de milho, foi de 300 mm. No entanto a maioria da precipitação ocorreu até 45 dias após a semeadura. Durante os 15 dias que precederam a floração da cultura, o acúmulo de precipitação foi de 16,5 mm. Após a floração, não foi registrada precipitação por 16 dias. Após esse período, até o estágio fenológico R4, o acúmulo de chuva foi de apenas 28,3 mm, permanecendo, assim, sem chuvas até o estágio R6 (maturação fisiológica).

No Local2, o acúmulo de chuva, durante o ciclo de cada cultura, foi de 191, 1060, 1047 e 922,5 mm, respectivamente, durante as safras 2017/18, 2018/19, 2019/2020 e 2020/2021 (FIGURA 2). Na primeira safra, 18 dias após a floração, foi observado um acúmulo de 49,3 mm. Após esse período, a cultura passou por restrição hídrica até a colheita. Nos cultivos de primavera/verão, não foram observados períodos de escassez hídrica. A chuva registrada, durante o desenvolvimento do trigo, na segunda safra de 2018/19, foi de 49 mm, sendo 39 mm, acumulados entre os primeiros dias, após o plantio e parte, durante a floração da cultura. Assim, durante o enchimento de grãos, houve pelo menos 30 dias sem chuva. Na segunda safra de 2020, a chuva registrada foi de 26 mm, sendo 23 mm, em um único dia, durante a fase de floração, marcando assim um longo período de seca, durante a fase de enchimento de grãos da cultura. Foi registrado o acúmulo de chuva, em cada local até a coleta de solo, sendo assim, no

Local1, a precipitação acumulada, ao longo dos quatro anos, foi de 1131, 2237, 3126 e 4990 mm, respectivamente. No Local2, a precipitação acumulada até o dia da amostragem de solo do primeiro ao quarto ano foi de 908, 2366, 3804 e 5120 mm, respectivamente (FIGURA 2).

### 2.3 Amostragem de solo

A amostragem de solo foi realizada no mesmo dia da colheita de cada cultura cultivada na primavera/verão nos anos de 2017/18, 2018/19, 2019/20 e 2020/21.

As amostras de solo foram coletadas das profundidades de 0 a 20 e 20 a 40 cm. Para cada profundidade, foram coletadas cinco amostras por parcela e misturadas para formar uma amostra composta. Todas as amostras foram secas ao ar, moídas, passadas por uma peneira de 2 mm e analisadas quanto às características físicas e químicas do solo.

As propriedades químicas do solo (pH do solo,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$  e H+Al trocáveis) foram determinadas seguindo os métodos descritos por Silva *et al.* (1999). Logo após, o pH do solo foi determinado em água (relação solo/água de 1:2,5).  $\text{K}^+$  foi extraído com solução de Mehlich<sup>1</sup> ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,0125 mol  $\text{L}^{-1}$  e HCl 0,05 mol  $\text{L}^{-1}$ ), na proporção de 1:10 (v/v solo/solução) e determinado por espectroscopia de emissão de chama.  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  trocáveis foram extraídos, usando uma solução de KCl 1 mol  $\text{L}^{-1}$  (1:10 v/v solo/solução) e determinados por espectrofotometria de absorção atômica com chama ar-acetileno e solução de lantânio a 5% para prevenir interferência. A acidez potencial (H+Al) foi extraída com Ca (OAc)<sub>2</sub> 0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  tamponado em pH 7,0. A soma dos cátions básicos trocáveis (SB =  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+$ ), capacidade de troca de cátions em pH 7,0 (T = SB + H+Al) e saturação por bases [V% =  $((\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+) / \text{T}) \times 100$ ] foram então estimados

### 2.4 Produtividade dos cultivos

A produtividade de grãos foi determinada pela colheita de três linhas de cinco metros de comprimento por parcela experimental. A umidade dos grãos foi padronizada para 13% e a produção por área da parcela foi definida. A produtividade por hectare (10.000 m<sup>2</sup>) foi estimada a partir da produção por parcela.

## 2.5 Análises estatísticas

Os dados de percentagem de Ca, Mg e Ca+Mg na CTC pH 7,0 foram relacionados com a produtividade relativa, usando o método da curva de calibração arcseno-log modificada, disponível no pacote *soiltestcorr* (Correndo *et al.*, 2023). Esse método permite identificar o valor crítico e intervalo de confiança do atributo de solo, para uma determinada produtividade relativa, sendo utilizados 95%. Os dados foram analisados com análise de variância e, quando houve diferença entre as doses de calcário (tratamentos), uma análise de regressão foi realizada. Os modelos testados foram lineares, quadráticos e lineares-plateau. A escolha do modelo foi baseada na significância dos parâmetros de ajuste, menor Critério de Informação de Akaike (AIC) e maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Todas as análises e desenhos de gráficos foram feitos com o software R versão 3.6.3 (R Development Core Team, 2019).

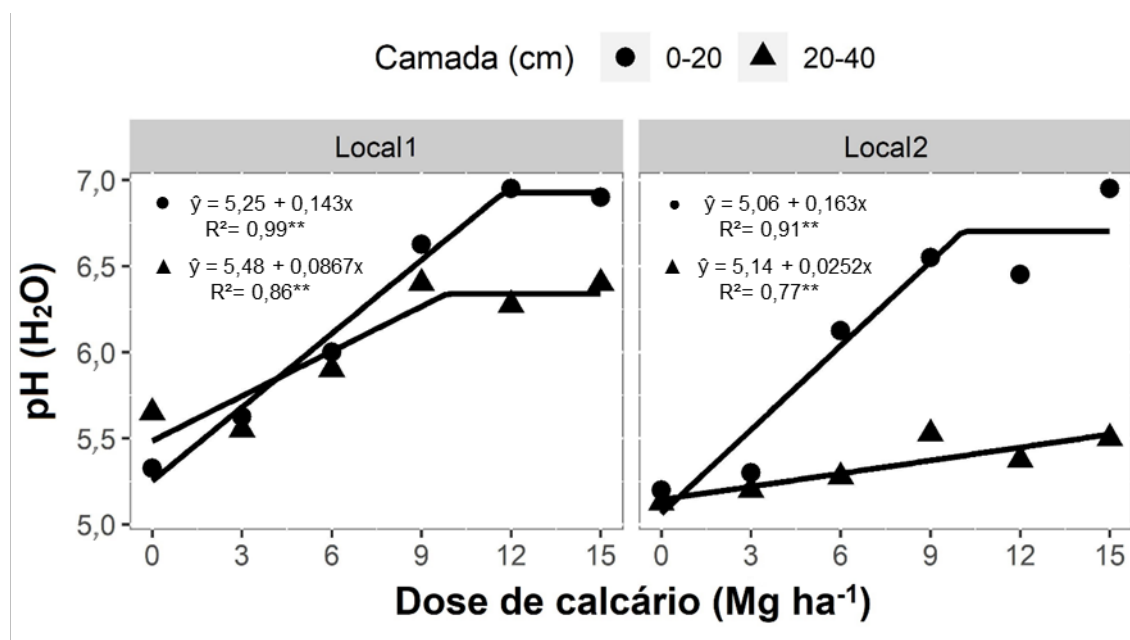


### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Relação entre as doses de calcário, teores de Ca e Mg no solo e participação na CTC potencial

Os dados da influência da calagem nos atributos químicos do solo são referentes ao quarto ano de estudo, ou seja, após seis cultivos, considerando-se as safras primavera/verão e outono/inverno para cada local. Independentemente do local e tratamentos, os valores de pH (H<sub>2</sub>O) do solo variaram de 5,2 a 7,0 para a camada de 0-20 cm e de 5,1 a 6,3 para a camada de 20-40 cm (FIGURA 3). Com base nos modelos de ajuste para pH (H<sub>2</sub>O), observou-se que as doses ótimas para a camada de 0-20 cm foram de 12 e 10 Mg ha<sup>-1</sup>, com pH (H<sub>2</sub>O) de 6,9 e 6,7, nos locais 1 e 2, respectivamente. As doses ótimas para a camada de 20-40 cm foram de 10 Mg ha<sup>-1</sup> (Local 1) e 15 Mg ha<sup>-1</sup> (Local 2) e elevaram os valores de pH (H<sub>2</sub>O) dos solos para 6,3 (Local 1) e 5,5 (Local 2). Os aumentos dos valores de pH com as doses de calcário já eram esperados, pois os grupos OH<sup>-</sup> aumentam sua concentração, após a calagem e reagem com parte do H<sup>+</sup> no solo, aumentando o pH (H<sub>2</sub>O) (Oliveira; Pavan, 1996).

Figura 3 - Valores de pH (H<sub>2</sub>O) no solo nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm em função das doses de calcário incorporadas na camada de 0-40 cm em dois locais (Local 1 e 2) durante a safra 2020/2021



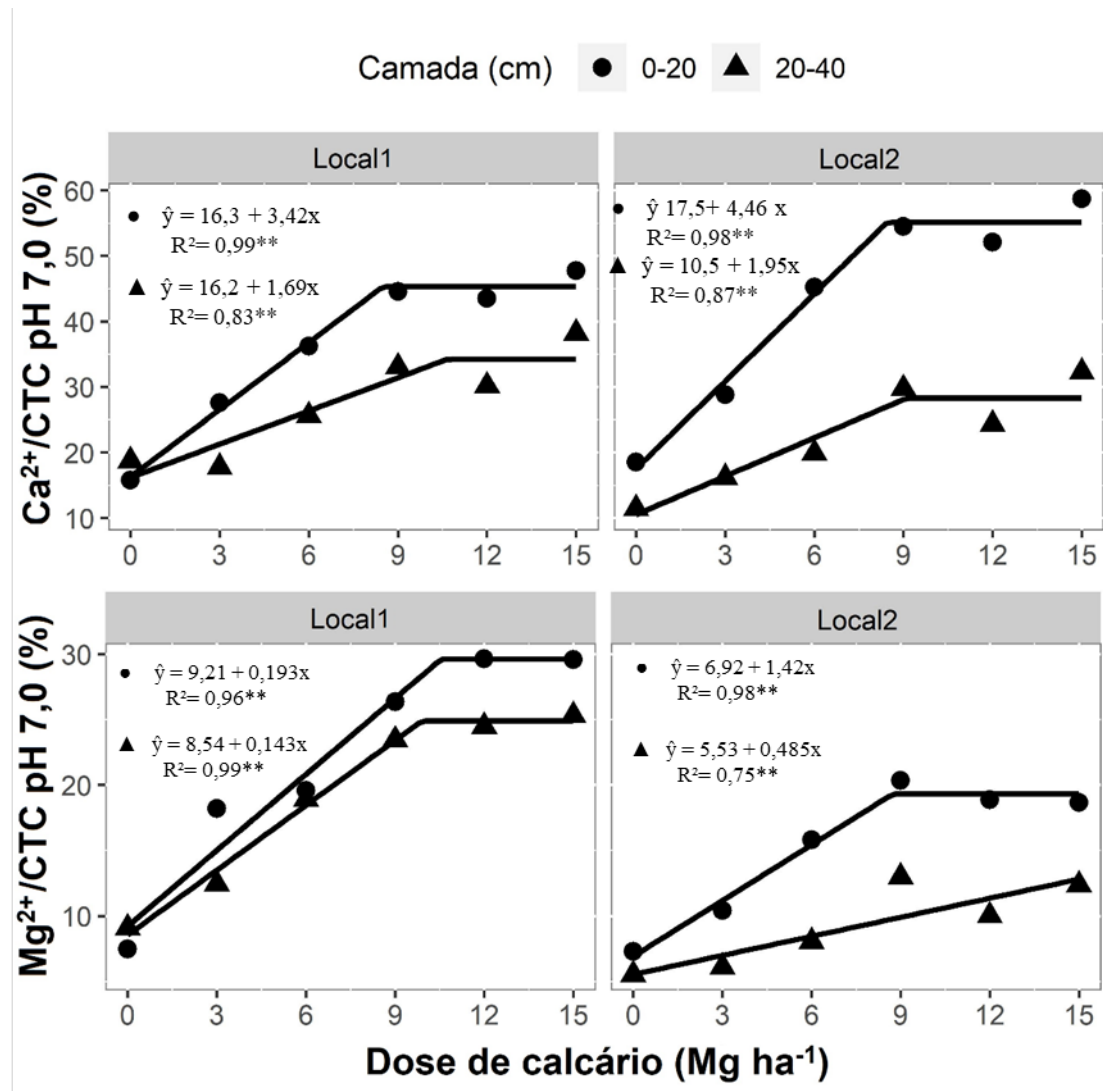
Fonte: Do autor (2023).

Após o quarto ano de cultivo, a dose que proporcionou maior ocupação da CTC potencial por  $\text{Ca}^{2+}$  na camada 0-20 cm, considerando-se os modelos de ajuste nos locais 1 e 2 foi a de  $8,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ , visto que os valores de  $\text{Ca}^{2+}$  na CTC potencial foram de 45 e 55 %, respectivamente (FIGURA 4). Para a camada de 20-40 cm, os modelos indicaram doses de 11 e  $9 \text{ Mg ha}^{-1}$ , para se atingir 34 e 28% de  $\text{Ca}^{2+}$  na CTC potencial dos solos dos locais 1 e 2, respectivamente. Para  $\text{Mg}^{2+}$ , os modelos indicaram que a ocupação máxima da CTC potencial na camada 0-20 cm ocorreu com a dose de  $11 \text{ Mg ha}^{-1}$  no Local1, elevando a percentagem de  $\text{Mg}^{2+}$  na CTC potencial para 30%; e  $9 \text{ Mg ha}^{-1}$  com 19% de saturação de  $\text{Mg}^{2+}$  no Local2 (FIGURA 4). Para a camada de 20-40 cm, os modelos de ajuste indicaram doses de 10 e  $15 \text{ Mg ha}^{-1}$ , com percentagem de  $\text{Mg}^{2+}$  na CTC do solo de 25 e 13%, para os Locais 1 e 2, respectivamente.

De acordo com os modelos, as doses que promoveram valores máximos de ocupação de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  na CTC pH 7,0 foram superiores a  $8,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ , para a correção da camada de 0-40 cm (FIGURA 4). Com as doses de 8,9 e  $8,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ , nos Locais 1 e 2, respectivamente, o somatório das participações de  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  na CTC potencial da camada de 0-20 cm foram de 74% após quatro anos de cultivo nos dois locais. Para a camada de 20-40 cm, o somatório das participações de  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  na CTC potencial foram de 59 e 45% com as doses de 10 e  $15 \text{ Mg ha}^{-1}$ , para os solos dos locais 1 e 2, respectivamente.

De acordo com as referências mais recentes sobre correção do solo, no cultivo de soja (Quaggio *et al.*, 2022), milho (Duarte; Cantarella; Quaggio, 2022), feijão (Quaggio *et al.*, 2022) e trigo (Cantarella *et al.*, 2022), a percentagem ideal de cátions na CTC pH 7,0 é de 70% para a camada de 0-20 cm, valores próximos aos que foram encontrados neste trabalho, após quatro anos da incorporação do corretivo, quando foram utilizadas doses superiores a  $8,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Para soja e milho, Fageria, V. (2001) observou valores adequados de saturação por Ca e Mg, próximos às faixas deste estudo. No entanto merece ser discutido é que os valores recomendados na literatura, para a saturação por bases (V%) de 70% (Cantarella *et al.*, 2022; Duarte; Cantarella; Quaggio, 2022; Quaggio *et al.*, 2022), foram obtidos no presente estudo com doses muito superiores àquelas que seriam calculadas para se atingir a V% igual a 70%. Considerando-se a camada de 0 a 20 cm, a dose calculada pela fórmula da saturação por bases, para elevar a V% a 70 (Raij *et al.*, 1996), para os solos dos locais 1 e 2, seriam de 1,6 e  $5,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ , considerando-se os corretivos utilizados nas áreas e as análises iniciais dos solos (Tabela 1).

Figura 4 - Participação de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  na CTC pH 7,0 (%) dos solos nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, em função das doses de calcário incorporadas na camada de 0-40 cm em dois locais (Local 1 e 2), durante a safra 2020/2021



Fonte: Do autor (2023).

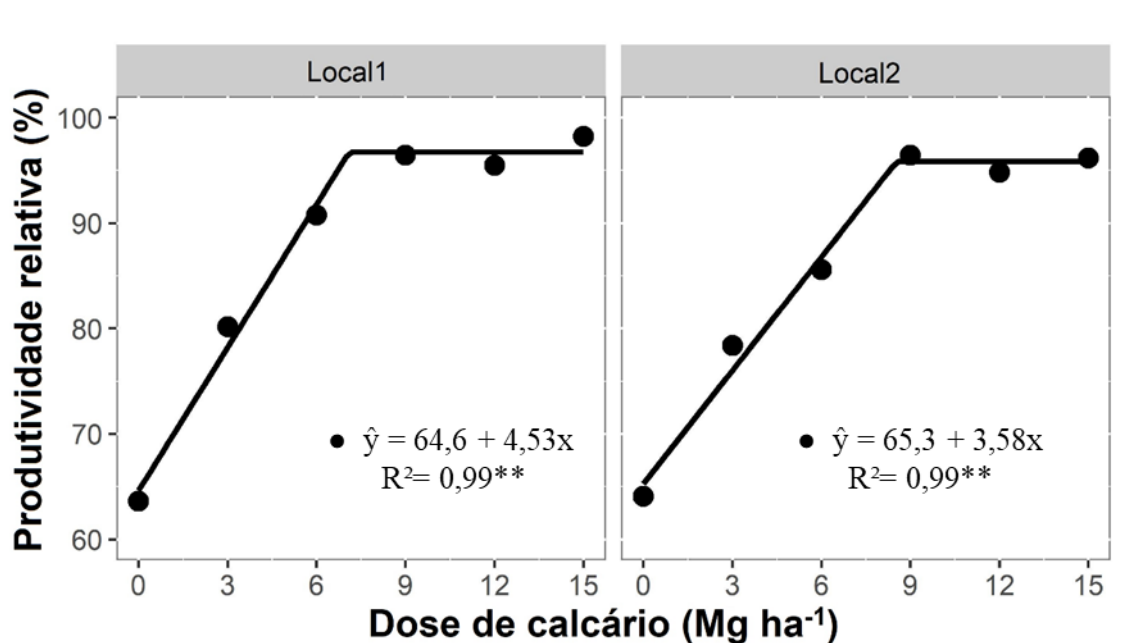
### 3.2 Relação entre a produtividade relativa das culturas e as doses de calcário

Na avaliação da resposta dos cultivos, foi considerada a produtividade relativa acumulada de grãos durante quatro anos. No Local 1, foi cultivada soja (safra 2017/18), soja (safra 2018/19), trigo (safra 2019/19), feijão (safra 2019/20), milho+braquiária (safra 2020/20) e soja (safra 2020/21). No Local 2, foi cultivado feijão (safra 2017/18), soja (safra 2018/19), trigo (safra 2019/19), soja (safra 2019/20), trigo (safra 2020/20) e milho (safra 2020/21).

O modelo plateau foi o que apresentou o melhor ajuste para os dois locais (FIGURA 5). A dose ótima que garantiu a produtividade relativa de 95% foi de 6,7 (Local 1) e 8,3  $\text{Mg ha}^{-1}$

(Local 2). Essa metodologia de 95% da produtividade relativa é considerada apropriada, na determinação de níveis adequados e tóxicos, porque o lucro da adubação geralmente atinge o máximo na faixa de 90% a 95% de produtividade relativa (Fageria; Baligar; Jones, 1997).

Figura 5 - Produtividade relativa de seis cultivos em dois locais (Local 1 e 2) em função das doses calcário incorporadas na camada de 0-40 cm



Fonte: Do autor (2023).

Com base nos resultados, observa-se que a dose ótima de calcário, considerando quatros anos de cultivos, foi superior a 6,7 Mg ha<sup>-1</sup>, para se atingir 95% produtividade relativa e melhorar a fertilidade do perfil do solo. O incremento na produtividade pela incorporação de calcário, na camada de 0-40 cm, ocorre em função da melhoria do ambiente radicular nos aspectos químicos, físicos e biológicos do solo (Fageria; Baligar, 2008; Gonzalez-Erico *et al.*, 1979; Moraes *et al.*, 2023). Com isso, há o desenvolvimento de um sistema radicular mais robusto que permite, inclusive, que as plantas aumentem a resiliência, para tolerar possíveis períodos de estresse hídrico, durante o ciclo (Ho *et al.*, 2005; Moraes *et al.*, 2023). Doss, Dumas e Lund (1979) e Gonzalez-Erico *et al.* (1979) já haviam demonstrado, há cinco décadas, que a incorporação profunda de calcário (30 cm) promove maior desenvolvimento radicular e reduz perdas de rendimento durante momentos de restrição hídrica. No entanto a maior parte dos experimentos desenvolvidos do Brasil foram realizados com a incorporação de calcário apenas até a camada de 0-20 cm (Fageria *et al.*, 1991; Fageria; Stone, 2004; Moreira *et al.*, 2015).

Com o presente trabalho, é possível observar a importância da dose adequada de corretivo e como cada solo responde de forma distinta. Considerando-se cálculos químicos, com as doses de 6,7 (Local 1) e 8,3 Mg ha<sup>-1</sup> (Local 2), foram adicionados à camada de 0 a 20 cm dos solos locais 1 e 2 4,2 e 6,9 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> de Ca<sup>2+</sup> e 3,3 e 2,9 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> de Mg<sup>2+</sup>, respectivamente. De maneira geral, os valores iniciais de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> na camada de 0 a 20 cm de ambos os locais eram de aproximadamente 1,5 e 0,5 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, respectivamente. Considerando-se a adequada incorporação do calcário, como mencionado por Moraes *et al.* (2023), esperava-se que fossem atingidos maiores teores de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> nos solos, com as doses aplicadas. Dessa forma, pressupõe-se que, nas parcelas em que foram aplicadas as maiores doses de calcário, houve uma movimentação de parte do Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>, para camadas abaixo da profundidade da incorporação, conforme discutido na literatura (Fageria, N., 2001; Fageria *et al.*, 1991; Quaggio *et al.*, 2022).

Ao observar os teores de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> do último ano de coleta, é possível perceber que os teores desses nutrientes não apresentaram grandes diferenças acima da dose estabelecida pelo modelo platô. Com isso, pode-se inferir que, com a aplicação de calcário nas maiores doses (> 9 Mg ha<sup>-1</sup>), houve elevação dos teores de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>, para a camada subjacente à que foi incorporada o calcário, melhorando a fertilidade do solo, no perfil do solo, para o crescimento radicular das plantas, conforme sugerido por outros autores (Fageria, N., 2001; Fageria *et al.*, 1991; Quaggio *et al.*, 2022). Após três anos da incorporação do calcário no Local 1 do presente experimento, Moraes *et al.* (2023) observaram maior desenvolvimento radicular até 60 cm de profundidade de plantas de milho+braquiária de segunda safra, nas parcelas que receberam as maiores doses de corretivo, o que indica que realmente houve movimentação de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> abaixo da camada em que o corretivo foi incorporado.

Vale destacar também que os maiores valores de pH (H<sub>2</sub>O) alcançados, com as maiores doses de calcário, não ultrapassaram 7,0 (FIGURA 3) e também não reduziram as produtividades das culturas (FIGURA 5), o que também foi observado por Börjesson e Kirchmann (2022). Esses autores obtiveram incremento de produtividade de trigo até valores de pH (H<sub>2</sub>O) entre 7,0 e 7,5. Diversos autores têm observado que o aumento da produtividade depende da correção da acidez do solo e aumento da disponibilidade dos nutrientes (Bossolani *et al.*, 2022; Caires, 2013; Caires *et al.*, 2008; Fageria; Baligar, 2001, 2008; Fageria; Stone, 2008; Moraes *et al.*, 2023) e não apenas dos valores de pH do solo de forma isolada. Mesmo para avaliar a disponibilidade de nutrientes, o pH do solo não pode ser utilizado de forma isolada (Hartemink; Barrow, 2023). Há necessidade de se considerar a capacidade das plantas de

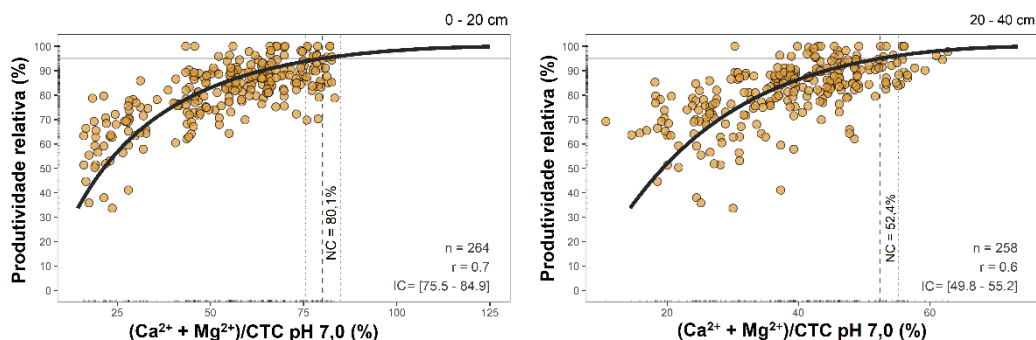
produzir exsudados radiculares e alterar o pH da rizosfera, além da influência de fatores químicos e físicos do solo (Hartemink; Barrow, 2023; Hinsinger *et al.*, 2003).

### 3.3 Relação entre a produtividade relativa das culturas e a participação de Ca e Mg na CTC potencial

Foram utilizados modelos matemáticos para se buscar definir a adequada ocupação de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  na CTC potencial dos solos dos dois locais. O estudo foi realizado de maneira conjunta e individual, buscando-se determinar qual seria a participação desses nutrientes na CTC potencial, para se atingir 95% de produtividade relativa, considerando-se todos os dados desde a instalação dos experimentos.

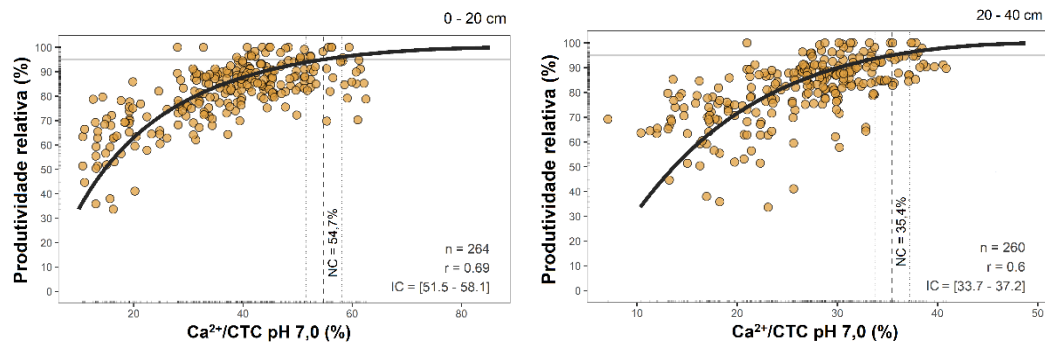
Os modelos de ajuste indicaram a necessidade de ocupar 80,1% da CTC pH 7,0 com  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  na camada de 0-20 cm para se alcançar a produtividade relativa de 95% (FIGURA 6). Ao analisar a camada de 20-40 cm, para atingir o mesmo objetivo de produtividade, a porcentagem de  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  na CTC pH 7,0 foi de 52,4%. Quanto à participação isolada do  $\text{Ca}^{2+}$ , os modelos ajustados, para as camadas de 0 a 20 e de 20 a 40 cm, indicaram que a participações de  $\text{Ca}^{2+}$  na CTC pH 7,0 deveriam ser de 54,7 e 35,4%, respectivamente, para se atingir 95% da produtividade (FIGURA 7). Para se alcançar 95% da produtividade relativa, considerando-se os modelos para  $\text{Mg}^{2+}$ , as participações de  $\text{Mg}^{2+}$  deveriam ser de 25,9 e 17,7% para as camadas de 0 a 20 e de 20 a 40 cm, respectivamente (FIGURA 8).

Figura 6 - Produtividade relativa, em função da das participações de  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  na CTC pH 7,0, nas profundidades de 0-20 e de 20 - 40 cm.



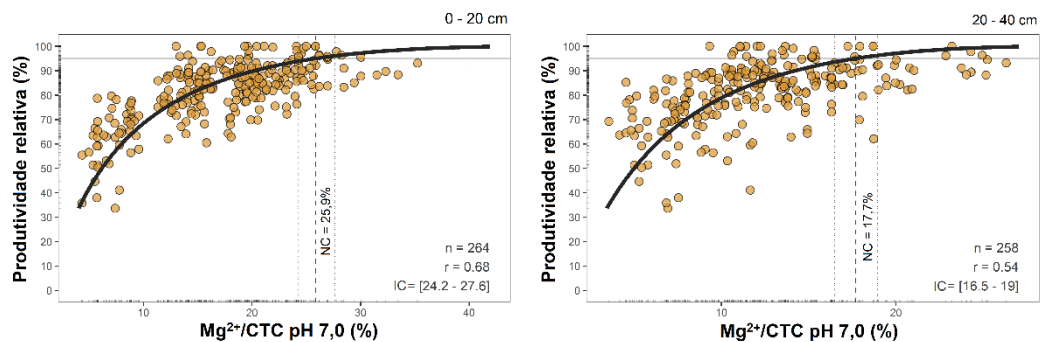
Fonte: Do autor (2023).

Figura 7 - Produtividade relativa, em função das participações de  $\text{Ca}^{2+}$  na CTC pH 7,0, nas profundidades de 0-20 e de 20 - 40 cm.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 8 - Produtividade relativa, em função das participações de  $\text{Mg}^{2+}$  na CTC pH 7,0, nas profundidades de 0-20 e de 20 - 40 cm



Fonte: Do autor (2023).

Os resultados deste trabalho mostram que os valores de ocupação da CTC pH 7,0 por  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  são superiores aos recomendados na literatura para as culturas da soja, milho, feijão e trigo (Cantatella *et al.*, 2022; Duarte; Cantarella; Quaggio, 2022; Quaggio *et al.*, 2022), sendo o objetivo atingir valores de V% igual 70 (0 a 20 cm).

O somatório da participação de  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  na CTC pH 7,0 que corresponde a 95% da produtividade relativa foi de 80% para a camada de 0-20 e de 52% na camada de 20-40 cm. Por outro lado, são escassos os dados de pesquisa que relacionam participação de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  na CTC potencial dos solos com produtividade relativa. Para Fageria, V. (2001), a participação adequada de  $\text{Ca}^{2+}$  na CTC potencial na camada de 0-20 cm deveria ser de 40%, enquanto a de  $\text{Mg}^{2+}$  deveria ser de 17%. Para a camada de 20-40 cm, os valores deveriam ser de 36 e 16 % para  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , respectivamente.

O método da saturação por bases (Raij *et al.*, 1996) é uma das principais metodologias, para a recomendação de calagem para os solos brasileiros, o qual preconiza elevar a V% para 70% na camada de 0-20 cm (Cantatella *et al.*, 2022; Duarte; Cantarella; Quaggio, 2022;

Quaggio *et al.*, 2022). Aplicando essa metodologia nos resultados de análise de solo, antes da implantação dos experimentos, as doses de calcário recomendadas seriam de 1,6 Mg ha<sup>-1</sup> (Local 1) e 5,7 Mg ha<sup>-1</sup> (Local 2) para a camada de 0-20 cm. Assim, as doses recomendadas por essa metodologia ficaram abaixo das doses que promoveram as maiores participações de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> na CTC potencial, que foram acima 8,5 Mg ha<sup>-1</sup> (0-20 cm) e 9 Mg ha<sup>-1</sup> (20-40 cm) para os locais 1 e 2.

Em decorrência das discrepâncias que têm sido observadas entre as doses que promovem melhorias no solo e as doses recomendadas, as quais foram observadas no presente estudo e por outros autores (Fageria, N., 2001; Fageria; Stone, 2008; Raij, 2011), métodos alternativos e mais acurados, baseados em algoritmos, vêm sendo propostos (Guaçoni; Sobreira, 2017; Teixeira; Alvarez; Neves, 2020). Técnicos de diversas regiões do país realizam alterações, na maneira de recomendar calagem, tentando alcançar o objetivo de correção (V% = 70%) e teores adequados de Ca e Mg. Inclusive, alguns técnicos simplesmente, multiplicam o valor da dose calculada, para elevação do V% a 70 pelo número 2, o que pode ser um risco em algumas situações.

Doses abaixo das adequadas causam grandes perdas, em relação ao custo das operações de aplicação e incorporação dos corretivos, bem como nas reduções das produtividades dos cultivos. Por outro lado, é conhecido o efeito de doses elevadas no aumento do pH e principalmente nas reduções das disponibilidades de micronutrientes catiônicos (Moreira, 2019).

Com os resultados obtidos nesses quatro anos de estudos, em que os incrementos de produtividade foram significativos, recomenda-se a calagem com base na participação de Ca e Mg na CTC potencial. Para cálculos de doses de calcário, para novas áreas de cultivo, sugere-se calcular a dose necessária para a elevação da participação de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> na CTC pH 7,0 para 55 e 26%, respectivamente. Além disso, propõe-se que seja calculada a dose, para corrigir a camada de 20 a 40 cm, elevando-se Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> na CTC pH 7,0 para 35 e 17%, respectivamente.



#### 4 CONCLUSÃO

A aplicação de calcário elevou o pH (H<sub>2</sub>O) do solo da camada de 0 a 20 cm para valores próximos a 7,0, sem perdas de produtividade;

As doses de calcário entre 6,7 e 8,3 Mg ha<sup>-1</sup> foram suficientes para a obtenção de 95% da produtividade relativa de grãos;

Obtiveram-se 95% da produtividade relativa de grãos, quando 55 e 26% (camada de 0-20 cm) e 35 e 17% (camada de 20-40 cm) da CTC potencial estava ocupada com Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>, respectivamente.

## REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, V. V. H.; RIBEIRO, A. C. Calagem. *In*: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 43-60.
- BÖRJESSON, G.; KIRCHMANN, H. Interactive long-term effects of liming and P application on clay soil: crop yield increases up to pH 7.5(aq). **Plant and Soil**, The Hague, v. 473, p. 407-421, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05293-1>.
- BOSSOLANI, J. W. *et al.* Improving soil fertility with lime and phosphogypsum enhances soybean yield and physiological characteristics. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, v. 42, n. 6, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00765-9>.
- CAIRES, E. F. Correção da acidez do solo em sistema plantio direto. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 141, p. 1-13, mar. 2013.
- CAIRES, E. F. *et al.* Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. **European Journal of Agronomy**, London, v. 28, n. 1, p. 57-64, Jan. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.05.002>.
- CAMBERATO, J. J. Bioavailability of calcium, magnesium, and sulfur. *In*: SUMMER, M. E. (ed.). **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC, 1999. p. 53-69.
- CANTARELLA, H. *et al.* (ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico, 2022. 489 p. (Boletim, 100).
- CORRENDO, A. A. *et al.* The soiltestcorr R package: an accessible framework for reproducible correlation analysis of crop yield and soil test data. **SoftwareX**, Oxford, v. 21, Feb. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.softx.2022.101275>.
- DOSS, B. D.; DUMAS, W. T.; LUND, Z. F. Depth of lime incorporation for correction of subsoil acidity 1. **Agronomy Journal**, Madison, v. 71, n. 4, p. 541-544, July/Aug. 1979. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj1979.00021962007100040005x>.
- DUARTE, A. P.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. Milho. *In*: CANTARELLA, H. *et al.* (ed.). **Boletim 100: recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agronômico, 2022. p. 46-47.
- FAGERIA, N. K. Resposta de arroz de terras altas, feijão, milho e soja à saturação por base em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 3, p. 416-424, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1415-43662001000300009>.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Ameliorating soil acidity of tropical oxisols by liming for sustainable crop production. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 99, p. 345-399, 2008. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)00407-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)00407-0).

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Improving nutrient use efficiency of annual crops in Brazilian acid soils for sustainable crop production. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 32, n. 7/8, p. 1303-1319, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1081/CSS-100104114>.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. **Growth and mineral nutrition of field crops**. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Marcel Dekker, 1997. 656 p.

FAGERIA, N. K. *et al.* Response of upland rice and common bean to liming on an Oxisol. *In*: WRIGHT, R. J.; BALIGAR, V. C.; MURRMAN, R. P. (ed.). **Plant-soil interactions at low PH**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1991. p. 519-525. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-011-3438-5\\_58](https://doi.org/10.1007/978-94-011-3438-5_58).

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F. Micronutrient deficiency problems in South America. *In*: ALLOWAY, B. J. (ed.). **Micronutrient deficiencies in global crop production**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008. p. 245-266.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F. Produtividade de feijão no sistema plantio direto com aplicação de calcário e zinco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, n. 1, p. 73-78, jan. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2004000100011>.

FAGERIA, V. D. Nutrient interactions in crop plants. **Journal of Plant Nutrition**, Monticello, v. 24, n. 8, p. 1269-1290, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1081/PLN-100106981>.

GONZALEZ-ERICO, E. *et al.* Effect of depth of lime incorporation on the growth of corn on an oxisol of Central Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Fayetteville, v. 43, n. 6, p. 1155-1158, Nov./Dec. 1979. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1979.03615995004300060019x>.

GUARÇONI, A.; SOBREIRA, F. M. Classical methods and calculation algorithms for determining lime requirements. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v. 41, p. 1-11, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20160069>.

HARTEMINK, A. E.; BARROW, N. J. Soil pH - nutrient relationships: the diagram. **Plant and Soil**, The Hague, v. 486, p. 209-215, Jan. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05861-z>.

HINSINGER, P. *et al.* Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: a review. **Plant and Soil**, The Hague, v. 248, p. 43-59, 2003.

HO, M. D. *et al.* Root architectural tradeoffs for water and phosphorus acquisition. **Functional Plant Biology**, Victoria, v. 32, p. 737-748, 2005.

KAMPRATH, E. J. Crop response to lime on soils in the tropics. *In*: ADAMS, F. (ed.). **Soil acidity and liming**. 2<sup>nd</sup> ed. Madison: American Society of Agronomy, 1984. p. 349-368.

KUNHIKRISHNAN, A. *et al.* Functional relationships of soil acidification, liming, and greenhouse gas flux. **Advances in Agronomy**, Madison, v. 139, p. 1-71, 2016.

- LI, Y. *et al.* Liming effects on soil pH and crop yield depend on lime material type, application method and rate, and crop species: a global meta-analysis. **Journal of Soils and Sediments**, New York, v. 19, p. 1393-1406, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2120-2>.
- LILLEY, J. M.; KIRKEGAARD, J. A. Benefits of increased soil exploration by wheat roots. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 122, n. 2, p. 118-130, May 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.03.010>.
- LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. A career perspective on soil management in the cerrado region of Brazil. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 137, p. 1-72, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.12.004>.
- LYNCH, J. P. Roots of the second green revolution. **Australian Journal of Botany**, Melbourne, v. 55, p. 493-512, 2007.
- MORAES, F. A. *et al.* Lime incorporation up to 40 cm deep increases root growth and crop yield in highly weathered tropical soils. **European Journal of Agronomy**, London, v. 144, p. 126763, Mar. 2023.
- MOREIRA, A. *et al.* Lime and cattle manure in soil fertility and soybean grain yield cultivated in tropical soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, London, v. 46, n. 9, p. 1157-1169, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1033542>.
- MOREIRA, S. G. Desafios para a sustentabilidade dos sistemas de produção com culturas anuais. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, v. 4, p. 1-12, 2019.
- OLIVEIRA, E. L. de; PAVAN, M. A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 38, n. 1/2, p. 47-57, 1996.
- QUAGGIO, J. A. *et al.* Soja. In: CANTARELLA, H. *et al.* (ed.). **Boletim 100: recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomico, 2022. p. 53-54.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Viena: R Foundation for Statistical Computing, 2019. Disponível em: <https://www.rproject.org>. Acesso em: 10 mar. 2020.
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011.
- RAIJ, B. van *et al.* **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1996.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; SILVA, N. M. Extraction of phosphorus, potassium, calcium, and magnesium from soils by an ion-exchange resin procedure. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 17, p. 547-566, 1986. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103628609367733>.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SILVA, C. A. *et al.* Mineralização de nitrogênio e enxofre em solos brasileiros sob influência da calagem e fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 34, n. 9, p. 1679-1689, set. 1999. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000900019>.

SILVA, F. C. da; SILVA, F. C. da. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12<sup>th</sup> ed. Washington, DC: Soil Survey Staff, 2014.

TEIXEIRA, W. G.; ALVAREZ, V. V. H.; NEVES, J. C. L. New methods for estimating lime requirement to attain desirable pH values in Brazilian soils. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v. 44, 2020. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20200008>.

WASSON, A. P. *et al.* Traits and selection strategies to improve root systems and water uptake in water-limited wheat crops. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 63, n. 9, p. 3485-3498, May 2012. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/ers111>.

WUTKE, E. B. *et al.* **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo; Fundação IAC, 2022. 489 p. (Boletim, 100).