



HUGO CARNEIRO DE RESENDE

**CALAGEM PARA MANUTENÇÃO DA CORREÇÃO DA
ACIDEZ EM SOLOS SOB PLANTIO DIRETO**

**LAVRAS - MG
2021**

HUGO CARNEIRO DE RESENDE

**CALAGEM PARA MANUTENÇÃO DA CORREÇÃO DA ACIDEZ EM SOLOS SOB
PLANTIO DIRETO**

Dissertação 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 Mestre.

Prof. Dr. Silvino Guimarães Moreira
Orientador

**LAVRAS - MG
2021**

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

Resende, Hugo Carneiro de.

Calagem para manutenção da correção da acidez em solos sob
plantio direto / Hugo Carneiro de Resende. - 2021.

87 p. : il.

Orientador(a): Silvino Guimarães Moreira.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. Sistema plantio direto. 2. Calcário. 3. Produtividade. I.
Moreira, Silvino Guimarães. II. Título.

HUGO CARNEIRO DE RESENDE

**CALAGEM PARA MANUTENÇÃO DA CORREÇÃO DA ACIDEZ EM SOLOS SOB
PLANTIO DIRETO**

**LIMING FOR MAINTENANCE OF ACIDITY CORRECTION IN SOILS UNDER
NO-TILLAGE**

Dissertação 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 Mestre.

APROVADA em 12 de agosto de 2021.

Dr. Volnei Pauletti UFPR

Dr. Guilherme Lopes UFLA

Prof. Dr. Silvino Guimarães Moreira
Orientador

**LAVRAS - MG
2021**

*Aos meus pais, José Abadio e Eliane, e ao meu
irmão, por todo o apoio, paciência, carinho e
incentivo, que possibilitaram essa conquista.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder saúde, sabedoria e discernimento para vencer esta etapa e me guiar durante esta caminhada.

Ao Prof. Dr. Silvino Guimarães Moreira, pela sua amizade, orientação, apoio, paciência, conselhos e ensinamentos de vida, que me auxiliaram nesta jornada.

À minha família, por todo o amor e apoio necessário à conclusão deste trabalho.

À minha tia Maria Inez, que não mediu esforços para me apoiar nesta dissertação.

À minha namorada Isabela, por todo o apoio, amor e carinho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudo, apoio essencial para viabilizar esta pesquisa. O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

À Associação dos Mineradores de Pains, Arcos e Região (AMPAR), pelo apoio financeiro, de fundamental importância para a execução dos experimentos.

À Equipe do Laboratório de Análises Agropecuárias (3RLAB), pela parceria na realização das análises dos experimentos.

A todos do Grupo de Pesquisa em Manejo de Produção (GMAP), pelo auxílio nas avaliações e gratidão pela amizade nesses quatro anos e meio de convívio e trabalho conjunto.

Ao Setor de Grandes Culturas, do Departamento de Agricultura (DAG), por disponibilizar toda a estrutura de recursos humanos e materiais, que possibilitaram a realização deste trabalho, em especial toda a ajuda do Antônio, do Ezequiel e do Arnald.

Ao Programa de Pós-graduação em Agronomia/Fitotecnia da UFLA, por todo suporte prestado pelos docentes e pela secretaria.

Aos responsáveis pelas fazendas parceiras, que possibilitaram a instalação e a condução dos experimentos, Willian (3W Agronegócios), Douglas (Estiva II), Eduardo Diniz (Mato Verde), e Lucídio (Rocinha).

Aos meus amigos, Antônio Henrique, Devison, Flávio, Júlia, Júnior, Mathusalém, Otávio (Açim), Thayná, por todos os momentos compartilhados, com total auxílio e incentivo no período desta pesquisa.

E a todos aqueles que de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigado!

“O segredo do sucesso é a constância do propósito.”

(Benjamin Disraeli)

RESUMO

O sistema de plantio direto (SPD) vem se tornando uma prática nacional comum e crescente no Brasil desde a década de 1970. No entanto, é importante ressaltar que para se alcançar alta produtividade, é fundamental a calagem em doses corretas para a manutenção da correção da acidez do solo. Para isso, deve-se considerar a diversidade das condições regionais específicas para os diferentes tipos de clima, solo, corretivo e o sistema de produção, fatores que interferem na mobilidade do calcário no solo. Nesse contexto, objetivou-se com o presente estudo, avaliar o efeito da aplicação de calcário em superfície ou incorporado, nos atributos químicos do solo e na produtividade de grãos de milho, soja e feijão, em SPD. Para isso, foram instalados quatro experimentos a campo, e avaliados durante dois anos agrícolas. O delineamento utilizado foi o de blocos ao acaso, com quatro repetições. Os tratamentos foram compostos por cinco doses de calcário (0, 2, 4, 6 e 8 Mg ha⁻¹) sem incorporação, e uma dose de 8 Mg ha⁻¹ com incorporação, por meio de grade aradora de 32". Avaliou-se modificações proporcionadas nas camadas de 0,00 a 0,10 m; 0,10 a 0,20 m; e de 0,20 a 0,40 m dos solos ao final da safra de verão de cada ano, o teor de nutrientes nas folhas das culturas na primeira safra e a produtividade de grãos, altura de plantas e peso de mil grãos. Foi observado aumento linear nos teores de Ca²⁺, Mg²⁺, pH (CaCl₂) e saturação por bases, e resposta linear inversa para a acidez potencial (H⁺Al) na camada superficial do solo com o aumento das doses. Foi observada diferença entre as áreas quanto a mobilidade dos efeitos do corretivo até 0,40 m de profundidade, sendo mais expressivos no solo com textura mais arenosa. A calagem proporcionou pouco ou nenhum efeito na disponibilidade de micronutrientes no solo e no teor foliar de Ca, Mg²⁺ e micronutrientes. No primeiro ano da instalação dos experimentos, não houve variação em produtividade de grãos. Na safra verão do segundo ano, a produtividade foi crescente e linear em apenas um dos locais. Conclui-se que a aplicação de calcário em SPD altera os parâmetros de acidez e teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ na camada superficial, com efeitos ao longo do tempo, em maiores profundidades, porém, estes efeitos não refletiram em aumento da produtividade de grãos da soja, milho e feijão nas duas primeiras safras após a aplicação.

Palavras-chave: Sistema Plantio Direto. Calcário. Produtividade. Fertilidade.

ABSTRACT

The no-tillage (NT) system is becoming a common and growing national practice in Brazil since the 1970s. However, it is important emphasize that to achieve high productivity is essential to liming in correct doses to maintain soil acidity. For this, the diversity of specific regional conditions must be considered for the different types of climates, soil, corrective and production system which are factors that interfere in soil mobility of limestone in the soil. In this context, the aimed with the present work to evaluate the effect of different doses of limestone, applied on the surface, with and without incorporation, on the chemical attributes of the soil and on the grain productivity (corn, soybean, and beans). The experiments were installed in four locations, in the off-season of 2019, and evaluated during two agricultural years, using a randomized block design, with four replications. The treatments were composed of five doses of limestone (0, 2, 4, 6 and 9 Mg ha⁻¹) without incorporation and one dose of 8 Mg ha⁻¹ with incorporation through a 32" harrow. In all experimental plots, soil samples were carried out in the layers from 0.00 to 0.10 m; 0.10 to 0.20 m; and from 0.20 to 0.40 m at the end of the summer harvest of each year, in addition the collection of leaves in the first harvest crops and still, the evaluation of three agronomic characters, yield, plant height and weight of a thousand grains. In these experiments it was observed a linear increase of calcium, magnesium, pH (CaCl₂) and base saturation, and inverse linear response for the potential acidity (H⁺A) in the topsoil with increasing doses. In other hand, for the lower layers, was observed a mobility difference of the corrective along the profile for the different areas; and in the area with more sandy textured soil, there was a linear response in the increase of calcium and magnesium and the pH values in the layer from 0.2 to 0.4 m after 22 months. As for the micronutrients, there was no change in the availability of soil contents and leaf concentration in the evaluated cultures. In the first year of installation of the experiments, there was no response in crop productivity. In the summer harvest of the second year, the productivity was increasing and linear only one of the locations. The applications of limestone with incorporation has the fastest capacity to change the chemical attributes of the soil in the subsurface, but this gain does not reflect the increase in productivity.

Keywords: No-tillage system. Limestone. Productivity. Fertility.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Variação do pH (CaCl₂) em função da calagem, em quatro locais ao longo de dois anos agrícolas nas profundidades de 0,00 a 0,10m, 0,10 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m. 38
- Figura 2 - Variação dos teores de cálcio em função da calagem em quatro locais ao longo de dois anos agrícolas nas profundidades de 0,00 a 0,10m, 0,10 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m. 43
- Figura 3 - Variação dos teores de magnésio em função da calagem em quatro locais ao longo de dois anos agrícolas nas profundidades de 0,00 a 0,10m, 0,10 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m. 47
- Figura 4 - Variação dos teores de V% em função da calagem em quatro locais ao longo de dois anos agrícolas nas profundidades de 0,00 a 0,10m, 0,10 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m. 52
- Figura 5 - Variação dos teores de H⁺Al em função da calagem em quatro locais ao longo de dois anos agrícolas nas profundidades de 0,00 a 0,10m, 0,10 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m. 54

LISTAS DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 -	Localização e altitude das áreas agrícolas utilizadas nos experimentos.	27
Tabela 2 -	Propriedades químicas dos solos antes da instalação dos experimentos, em diferentes profundidades.	29
Tabela 3 -	Análise de textura do solo em diferentes profundidades, em cada local.....	30
Tabela 4 -	Dados de cultivo de cada uma das safras em cada um dos locais, durante o período experimental de 2019 a 2021.	33
Tabela 5 -	Efeito da calagem nos teores de micronutrientes do solo, na safra 2019/2020 em quatro locais.	56
Tabela 6 -	Efeito da calagem nos teores de micronutrientes do solo, na safra 2020/2021 em quatro locais.	57
Tabela 7 -	Efeito da calagem nos teores de micronutrientes do solo, na safra 2020/2021 em quatro locais.	58
Tabela 8 -	Concentrações de nutrientes nas folhas de soja e milho em função de doses crescentes de calcário, na safra 2019/2020.	65
Tabela 9 -	Concentrações de nutrientes nas folhas de soja e milho em função de doses crescentes de calcário, na safra 2020/2021.	66
Tabela 10 -	Peso de mil grãos (PMG) de soja, milho, e feijão, em função das diferentes doses de calcário com e sem incorporação (inc), em quatro locais.	68
Tabela 11 -	Altura de plantas de soja, milho e feijão, em função das diferentes doses de calcário com e sem incorporação (inc), em quatro locais.	69
Tabela 12 -	Produtividade de soja, milho, e feijão, em função das diferentes doses de calcário com e sem incorporação, em quatro locais.	70
Quadro 1 -	Precipitação pluviométrica mensal nos locais, durante o período do experimento	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Sistema de plantio direto (SPD).....	14
2.2	Acidez do solo	15
2.3	Correção do solo com a calagem	18
2.4	Eficiência da calagem na superfície	21
3	MATERIAL E MÉTODOS	26
3.1	Caracterização da área experimental	26
3.2	Avaliações	34
3.2.1	Coleta de folhas e análise foliar	34
3.2.2	Caracteres agronômicos e produtividade.....	34
3.2.3	Análise de solo	35
3.2.4	Análise estatística	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
4.1	Efeito das doses de calcário nos atributos químicos dos solos	37
4.1.1	pH (CaCl₂)	37
4.1.2	Cálcio	41
4.1.3	Magnésio	45
4.1.4	Saturação por bases (V%)	48
4.1.5	Acidez Potencial (H+Al)	53
4.2	Efeitos de diferentes doses de calcário sob os teores dos micronutrientes no solo	55
4.3	Efeitos das diferentes doses de calcários sob a concentração foliar de nutrientes.	60
4.4	Efeitos das doses de calcários sob SPD nos componentes agronômicos	67
5	CONCLUSÃO	73
	REFERÊNCIAS.....	74
	APÊNDICES	83

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL

1 INTRODUÇÃO

A demanda mundial crescente de alimentos nos últimos anos vem sendo impulsionada pelo aumento populacional e de renda, em vários países. Com isso, a pressão pela verticalização da produção agrícola nos principais países exportadores fomenta cada vez mais a adoção de novas tecnologias, a fim de garantir a segurança alimentar mundial (FRÓNA *et al.*, 2019).

Estima-se que a produção mundial de alimentos deve dobrar até 2050, e o Brasil poderá contribuir com até 40% do crescimento dessa produção (FAO, 2009). Em contrapartida, a grande pressão exercida pela população mundial quanto a preservação ambiental, desafia cada vez mais os produtores a adotarem meios mais sustentáveis para o aumento da produtividade, sem perdas da biodiversidade e depredação dos ecossistemas (CARDINALE *et al.*, 2012).

Por outro lado, segundo a FAO (2009), 33% dos solos do mundo estão degradados e os principais problemas são erosão, salinização, compactação, acidificação e contaminação, pois reduzem a fertilidade dos solos, requisito fundamental para o aumento da produtividade. No Brasil, como os demais países localizados nas regiões tropical e subtropical, os solos, em sua maioria, são naturalmente ácidos (CIOTTA *et al.*, 2004), característica que demanda intervenção para a correção da acidez, que pode ser por meio da incorporação de vários insumos.

Nesse contexto, a substituição do sistema convencional de plantio pela prática de cultivos sob sistema de plantio direto (SPD), vem ocorrendo desde o fim do século XX, em grande parte da área cultivada no Brasil (BORTOLETI, 2015). Segundo a Agroconsult (2021), estima-se que no Brasil exista em torno de 38,6 milhões de hectares de áreas cultivadas no SPD.

Apesar dessa grande expansão das áreas de cultivo sob SPD, segundo Moreira (2019) diversos desafios ainda precisam ser superados, destacando-se a baixa cobertura dos solos e a ausência de rotação de culturas, além da dificuldade de correção da acidez do solo após a entrada nesse sistema de cultivo. Os principais problemas enfrentados com a calagem no SPD são a baixa solubilidade e a mobilidade do calcário no perfil do solo, em especial naqueles argilosos e compactados. Esses problemas se agravam ainda mais nas áreas com baixos teores de matéria orgânica (MO), por não gerarem elevadas quantidades de H^+ para solubilização do calcário e possuírem poucos ligantes orgânicos para o carregamento das bases cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) (RHEINHEIMER *et al.*, 2000; PENN, 2017).

Considerando todos esses fatores, tem-se na realidade no país, muitas áreas sob SPD que vieram da transição do sistema convencional sem a adequada correção de solo antes da sua adoção. Assim, sob o SPD, com novas aplicações de calcário apenas na superfície, cria-se uma condição de pH acima de 6,0 nas camadas superficiais, que é desfavorável à solubilização do calcário e, conseqüentemente, à correção das camadas inferiores do solo (ALLEN; HOSSNER; 1991; MILLER, 2015; PENN, 2019).

Para solos cultivados sob SPD em Minas Gerais, há poucos estudos avaliando os efeitos da aplicação superficial de calcário sem incorporação e, atualmente, as recomendações de calagem são baseadas em estudos desenvolvidos na região sul do país, principalmente no estado do Paraná. Considerando essa realidade e o fato das recomendações oficiais de corretivos e fertilizantes estarem desatualizadas para as condições específicas de Minas Gerais, há grandes divergências nas doses recomendadas para condições semelhantes pelos técnicos de campo. Muitos desses técnicos preferem fazer um preparo ocasional do solo, para incorporação do corretivo, com uma reabertura da área, ainda que sem respaldo científico.

Diante desse panorama, persistem grandes dúvidas relacionadas à continuidade, ou não, da aplicação superficial de calcário, sem incorporação no Estado de Minas Gerais. Algumas perguntas precisam ser respondidas: Qual a dose máxima de calcário pode ser aplicada na superfície, sem incorporação? Qual o prazo máximo para a reação deste corretivo sem incorporação? Qual o tempo necessário para que o calcário aplicado corrija pelo menos a camada de 0,00 a 0,20 m? O preparo ocasional do solo para a incorporação do calcário não seria mais eficiente do que sua aplicação superficial, sem incorporação? Haveria diferenças nas respostas do calcário aplicado em solos de textura contrastante?

Na tentativa de contribuir com as questões levantadas, o presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar as alterações proporcionadas pela aplicação de calcário na correção da acidez e disponibilidade de nutrientes no solo e na produtividade de grãos de milho, soja e feijão, em áreas cultivadas sob SPD.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sistema de plantio direto (SPD)

A sustentabilidade socioeconômica e ambiental vem a cada dia ganhando mais força quando se refere a produção de alimentos. Dentre os pilares do tripé socioeconômico-ambiental, o SPD se apresenta como uma das práticas fundamentais para a produção sustentável.

Desde o final dos anos 1970, este sistema iniciado no estado do Paraná expandiu-se por todo o país. Essa prática de cultivo vem sendo adotada pelos produtores brasileiros e está baseada em três princípios básicos: o mínimo revolvimento do solo; a cobertura permanente do solo com plantas vivas ou palhada e; a diversificação de plantas na rotação de cultivos (FEBRAPDP, 2018). Com esses fundamentos, o SPD revolucionou a agricultura brasileira e vem crescendo em todo o país, atingindo cerca de 38,6 milhões de hectares segundo a Agroconsult (2021). A adoção do SPD por um longo período promove melhoria nas características químicas do solo e na ciclagem de nutrientes, pois diminui os efeitos causados pelo impacto das gotas de chuva, promove o aumento da matéria orgânica (MO) e maior conservação da biologia do solo (MOREIRA, 2019; PEIXOTO, 2020). A palha deixada no solo cria um ambiente extremamente favorável para o crescimento vegetal, contribuindo para a estabilização da produção, trazendo o aumento da rentabilidade ao longo dos anos (SAUERESSIG, 2019).

O SPD apresenta inúmeras vantagens como diminuição de operações para o preparo do solo, menor degradação dos agregados, retenção de umidade, menor assoreamento de rios, aumento da MO, maior eficiência do uso de fertilizantes, dentre outros fatores (MUZILLI, 1981; RESENDE, 2011). Com a redução das operações de preparo do solo no SPD, o produtor conseguiu ser mais ágil, reduzindo o tempo entre a colheita da primeira safra e a semeadura da segunda safra. Assim, a expansão do SPD no Brasil contribuiu também para a expansão das áreas de segunda safra no país.

Diferentemente do sistema de cultivo convencional, no qual ocorre a incorporação do calcário com práticas de preparo de solo; em áreas sob SPD, a calagem vem sendo recomendada com aplicações superficiais, sem incorporação, visando atender uma das premissas desse sistema que é revolvimento mínimo do solo (CAIRES, 2013; RESENDE, 2016). Com isso, a adoção do SPD de forma sustentável e com altas produtividades necessita de doses adequadas de corretivos no seu estabelecimento, principalmente o calcário, já que este é o principal insumo responsável pela neutralização do alumínio e hidrogênio, e que apresenta baixa solubilidade em

água (CaCO_3 : $0,00616 \text{ g L}^{-1}$ e MgCO_3 : $0,0157 \text{ g L}^{-1}$ a 25°C) e baixa mobilidade no solo (MOREIRA, 2019). Nesse sentido, são indispensáveis uma incorporação profunda e boa homogeneização do calcário no solo, para que se promova maior eficiência na distribuição de Ca^{2+} e Mg^{2+} no perfil do solo, além disso, priorizar a escolha de calcários com menor reatividade em áreas de abertura é importante para garantir um maior efeito residual (RAMPIM *et al.*, 2011).

Há atualmente no Brasil, muitas áreas de cultivo sob SPD que vieram da transição do sistema convencional para o SPD, sem a adequada correção inicial de solo. Devido a isto, as novas aplicações de calcário apenas na superfície, sem incorporação, visando corrigir os solos pode criar inicialmente uma condição de pH acima de 6,0 nas camadas superficiais, que é desfavorável à solubilização do calcário e, conseqüentemente, correção das camadas inferiores do solo (ALLEN; HOSSNER, 1991; MILLER, 2015; PENN, 2019). Nesta condição, há baixa solubilidade do calcário na superfície do solo. Desta forma, há nestas áreas, um alto gradiente químico no perfil, com altos valores de pH e teores de cátions básicos na camada superficial em comparação as inferiores. Trata-se de uma condição em que haverá baixa efetividade com a aplicação de calcário superficial sem incorporação, pois sua reação de solubilização em meios muito alcalinos é muito lenta, o que prejudica o alcance do seu efeito nas camadas inferiores (ALLEN; HOSSNER, 1991).

Dada a importância de iniciar o SPD com saturação por bases ideais e teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} adequados, em trabalhos recentes por Moraes (2019), foram observadas respostas no aumento de produtividade das culturas com aplicação de doses de calcário superiores às indicadas pelos principais métodos de recomendação de calagem no Brasil, o Método da Saturação por Bases (Método de São Paulo)¹ e o Método da Neutralização do Alumínio Tóxico e Elevação dos Teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} (Método de Minas)².

2.2 Acidez do solo

Didaticamente, a acidez do solo pode ser entendida por três formas, acidez potencial, trocável e ativa (RAIJ, 2011). A acidez ativa é representada pela atividade dos íons H^+ dissociados na solução do solo, medida através do pH. Por outro lado, a acidez trocável é representada nos solos brasileiros em sua maioria pelo Al^{3+} e por alguns íons de H^+ ligados por

¹Método de cálculo de calagem desenvolvido para atingir um percentual de saturação por bases (V%) na capacidade de troca de cátions (CTC) potencial do solo.

²Método de recomendação de calagem desenvolvido em Minas Gerais, que busca neutralizar o alumínio e atingir os valores críticos de Ca^{2+} e Mg^{2+} .

forças eletroestáticas na superfície dos coloides do solo. Por último, denomina-se acidez potencial como aquela representada pelos elementos (H^+ e Al^{3+}), que constituem o poder tampão do solo, o qual é definido como a resistência do solo às variações bruscas de pH. Ou seja, acidez potencial se refere aos íons que não se dissociaram ainda e estão ligados ao solo, em equilíbrio com a fase líquida (SOUSA *et al.*, 2007; MOREIRA; MORAES, 2018).

A maior parte dos solos de regiões tropicais e subtropicais são naturalmente ácidos e apresentam altos teores de Al^{3+} (CIOTTA *et al.*, 2004, RAIJ, 2011). Estima-se que 30% dos solos do planeta são ácidos, os quais se localizam em importantes regiões produtoras de alimentos (PROCHNOW, 2004).

Essa acidificação original é fruto do processo de intemperismo desses solos, os quais devido a força da adsorção entre cada íon e a superfície de ligação, chamada na fertilidade do solo de série liotrópica, a qual é proporcional à valência dos cátions e inversamente proporcional ao raio iônico hidratado do cátion. Por isso, cátions como o Al^{3+} , de maior valência são mais fortemente atraídos para as proximidades das partículas com cargas negativas, em detrimento do potássio, Ca^{2+} e Mg^{2+} , com menores valências. Por sua vez, o hidrogênio, apesar de ser monovalente, é o elemento de maior força de atração pelas cargas negativas do solo, devido sua ligação covalente com os coloides, enquanto os demais cátions realizam ligação eletrostática (PAULETTI, 2020).

Com isso, o Al^{3+} e H^+ , durante o processo de intemperismo em regiões quentes e/ou úmidas, permaneceram ligados aos coloides no solo, enquanto os cátions básicos de menor valência foram lixiviados. Esta é uma das razões que faz com que os solos tropicais apresentem altas concentrações de hidrogênio e alumínio e baixos teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , sódio e potássio na forma trocável (SOUSA, 2004).

Para a compreensão do manejo da acidez do solo é muito importante considerar que mesmo após a correção da acidez, os solos apresentam uma tendência à acidificação, a qual é acelerada pela intensificação do cultivo agrícola, devido à absorção e exportação de cátions pelas plantas. Quando ocorre a absorção de um cátion pelas plantas, as mesmas promovem a exsudação de íons de hidrogênio na rizosfera, para manter a eletro neutralidade da planta. Em locais com alta exportação de cátions como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ pelos cultivos sucessivos, sem a correta correção e reposição dos mesmos, bem como pela erosão dos solos de algumas áreas, os elementos responsáveis pela acidez do solo Al^{3+} e H^+ prevalecem na (CTC) dos solos (LEPSCH, 2010).

A utilização de fertilizantes fosfatados e, principalmente os nitrogenados, de origem amoniacal e amídica e a mineralização da MO também promovem a acidez do solo

(PROCHNOW, 2004; SOUSA *et al.*, 2007). A adubação nitrogenada é a que mais contribui para a acidificação dos solos, pois quando uma fonte amoniacal ou amídica é aplicada ao solo, durante o processo de nitrificação ocorre a oxidação do amônio (NH_4^+) a nitrato (NO_3^-), gerando íons de H^+ .

A acidificação do fertilizante nitrogenado é representada pelo índice de acidez, ou seja, a quantidade equivalente de CaCO_3 necessária para neutralizar a acidez originada por cada 100 kg do fertilizante aplicado. O sulfato de amônio é a fonte que apresenta maior capacidade de acidificação do solo, apresentando índice de acidez de 110, enquanto para ureia é 84 e para o nitrato de amônio o índice é 62 (VITTI; PROCHNOW, 1996). Em relação a ureia, embora ocorra acidificação com a sua aplicação, existe no processo de sua dissolução a geração de alcalinidade em volta dos grânulos do fertilizante, devido à hidrólise pela ação da enzima urease que converte a ureia em amônio (NH_4^+), e por esta reação consumir H^+ tem a capacidade de elevação do pH próximo ao grânulo, o que favorece a transformação deste NH_4^+ em NO_3^- , favorecendo a perda por lixiviação (ROCHETTE *et al.*, 2013).

Em relação aos fertilizantes fosfatados, há uma grande variação do potencial de acidificação de acordo com a fonte utilizada, sendo aqueles mais concentrados e que possuem em sua composição maiores quantidades de amônio tendem a provocar maior acidificação do solo, devido ao processo de nitrificação, como as fontes mais conhecidas o fosfato monoamônico (MAP) e o fosfato diamônico (DAP). Em relação às fontes supersimples e supertriplo, sabe-se que estes não têm poder de alteração do pH do solo (MALAVOLTA, 1981; MERTEN, 2019).

Outros fatores que causam acidificação do solo estão relacionados com o material de origem, clima, agentes de intemperismo e o grau de intensificação do sistema de produção. Regiões com altas precipitações apresentam tendência maior à acidificação, devido ao maior potencial de liberação de cátions básicos e sua lixiviação (NOVAIS, 2007). Além de fatores naturais que promovem a acidificação do sistema, destaca-se a respiração da raiz, com exsudação de H^+ , dissociação do gás carbônico, naturalmente favorecida por solos de pH mais elevados acima de 5,2 e a liberação de H^+ na solução do solo pela decomposição da MO (LOPES *et al.*, 1991, TRUOG, 2004; YE *et al.*, 2019).

Por fim, pode-se dizer que o potencial de acidificação do solo é muito particular de cada área, variando de acordo com a textura, já que solos ácidos e argilosos tendem a apresentar maiores quantidades de íons H^+ e Al^{3+} , ligados aos coloides do solo. Além disso, os teores de MO do solo têm alta influência na acidez do solo, devido as substâncias húmicas presentes e

liberação de íons H^+ , fornecendo um maior poder tampão ao solo (PROCHNOW, 2004; RAIJ, 2011).

Atualmente, sabe-se que a acidificação do solo influencia diretamente os fatores relacionados à produtividade das culturas, pois, geralmente está associada a altos teores de Al^{3+} e baixos níveis de bases como Ca^{2+} e Mg^{2+} , promovendo um baixo crescimento radicular e da parte aérea das plantas (RAIJ, 2011). A interferência do alumínio no processo de divisão celular paralisa o crescimento de raízes e gera alterações morfológicas, causando aumento da espessura e diminuição da ramificação, prejudicando reduções expressivas na absorção de água e nutrientes nas camadas subsuperficiais, promovendo maior suscetibilidade das culturas ao déficit hídrico e, conseqüentemente, redução na produtividade das culturas (CAIRES, 2013; TAIZ; ZEIGER, 2004). Desta forma, torna-se importante a prática da calagem com doses adequadas de calcário para a neutralização da acidez e fornecimento de Ca^{2+} e Mg^{2+} .

2.3 Correção do solo com a calagem

A calagem é a primeira etapa para se iniciar a construção da fertilidade do solo, pois é o método mais efetivo para melhorar a disponibilidade de alguns nutrientes e o ambiente para o crescimento radicular; e por consequência, possibilita atingir altos tetos produtivos (MOREIRA; MORAES, 2018; RESENDE *et al.*, 2016). Em resumo, a aplicação de calcário visa atingir três objetivos, fornecer de Ca^{2+} e Mg^{2+} , neutralizar o alumínio tóxico, e elevar o pH para níveis adequados às culturas. Assim, a calagem irá promover melhores condições físicas, químicas e biológicas do solo; melhoria no ambiente para bactérias fixadoras de nitrogênio, e garantia de maior eficiência no uso de outros nutrientes (PROCHNOW, 2004; RAIJ, 2011).

A realização da calagem em doses corretas é fundamental, pois se for aplicada em altas quantidades, resulta em elevados valores de pH, o que pode causar reduções nas disponibilidades, principalmente dos micronutrientes catiônicos (Cu^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} e Zn^{2+}) no solo, reduzindo suas disponibilidades às plantas (ALVAREZ *et al.*, 1999; RHOTON, 2000; MOREIRA *et al.*, 2017). Esta disponibilidade dos nutrientes, além de estar relacionada ao pH do solo, temperatura, atividade de microrganismos, competição de sítios de ligação com outros nutrientes, dinâmica do sistema de cultivo, está relacionada principalmente ao teor de MO, já que alguns micronutrientes podem ficar adsorvidos nesta, e diminuir sua disponibilidade (MOREIRA *et al.*, 2006; MOREIRA *et al.*, 2016).

A constituição básica do calcário é carbonato de Ca^{2+} ($CaCO_3$) e/ou de Mg^{2+} ($MgCO_3$) e sua solubilização ocorre na presença de água. Inicialmente, há dissociação dos cátions Mg^{2+}

e Ca^{2+} , e, posteriormente, sobra o íon bicarbonato (HCO_3^-), o qual reage com o H^+ da solução, formando água e gás carbônico, promovendo o efeito de elevação do pH. Porém, a quantidade de hidrogênio na solução é muito pequena, entretanto, o equilíbrio entre a fase sólida e a líquida, fornece novos cátions de H^+ , gerando maior dificuldade de neutralização, fato este relacionado ao poder tampão, particular de cada solo (CAIRES, 2016; RAIJ, 2011).

Quanto aos métodos de recomendação de calagem utilizados no Brasil, para a recomendação de calcário, destacam-se o Método da Saturação por Bases - Método de São Paulo (RAIJ *et al.*, 1997); Método da Neutralização do Alumínio Tóxico e Elevação dos Teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} - Método de Minas (ALVAREZ *et al.*, 1999); e Método SMP (SHOEMAKER *et al.*, 1961). Todos esses métodos consideram os aspectos químicos do solo, seja de forma direta ou indireta, para o fornecimento de doses de calcário suficientes para a correção da acidez, dos teores de Al trocáveis, além de fornecer Ca^{2+} e Mg^{2+} em níveis adequados.

O método SMP, focado para os estados do RS e SC, consiste em determinar o pH das amostras de solo numa solução denominada SMP (Shoemaker, MacLean e Pratt); segundo a Comissão de Química e Fertilidade do Solo do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (CQFS-RS/SC, 2004). Na prática, a dose de calcário recomendada é baseada no valor de pH SMP observado no solo e no valor do pH (H_2O) do solo desejado, que varia de 5,5, 6,0 ou 6,5, dependendo da cultura e/ou sistema de cultivo. Quanto menor o pH SMP de uma amostra de solo, maior é seu poder tampão (H^+Al) e, portanto, maior será a necessidade de calcário recomendada para correção. Porém, a limitação deste método se deve ao uso restrito a determinadas regiões, pois exige curvas de calibração específica para cada tipo de solo, feitas através da relação do poder tampão do solo (H^+Al) com o pH SMP da amostra, conforme descrito por Kaminski *et al.* (2002) e Tomé Júnior (1997).

Por sua vez, o método de elevação da saturação por bases (Método de São Paulo), considera a quantidade de calcário para elevar o V% para valores adequados às culturas, que mede indiretamente o fornecimento de bases para teores adequados para a máxima produtividade (RAIJ, 1997). Por sua vez, o método Método da Neutralização do Alumínio Tóxico e Elevação dos Teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} considera o somatório da quantidade necessária de calcário para neutralizar a acidez trocável do solo, mais a quantidade para elevar os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} a teores adequados para altas produtividades das culturas (ALVAREZ *et al.*, 1999). As principais críticas que podem ser feitas em relação a essa metodologia são relacionadas aos valores empíricos de Y (solo) e exigência de apenas $2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ pela cultura. Isso porque no próprio boletim da Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais – CFSEMG - 5ª aproximação (1999) apresenta-se como faixa de valores

adequados para Ca^{2+} e Mg^{2+} , os valores de 2,5 a 4,0 e, de 0,9 a 1,5 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente. Outro ponto importante, é que a metodologia não considera a MO nos cálculos, uma vez que essa é a principal responsável pela CTC e capacidade de tamponamento desses solos (MOREIRA; MORAES, 2018).

Devido aos fatores mencionados, normalmente as doses calculadas pelo Método da Saturação por Bases são maiores do que as calculadas pelo Método de Minas Gerais, para os solos de textura média a argilosa. No entanto, deve ser ressaltado também, que vem sendo observado em alguns trabalhos de pesquisa, que as máximas produtividades das culturas anuais têm sido obtidas com doses acima daquelas calculadas pelo Método da Saturação por Bases (BARBOSA, 2000; RAIJ, 2011; RESENDE *et al.*, 2016; MORAES, 2019). Além disso, atualmente, as lavouras com altas produtividades de milho têm apresentado valores de Ca^{2+} , de 3 a 4,0 e Mg^{2+} acima de 1,0 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ (MOREIRA; MORAES, 2018).

Ao se tratar da necessidade de calagem para solos sob SPD estabelecido, a recomendação também é muito variada, assim como os resultados obtidos por diferentes autores, como mostra a revisão feita por Caires (2013). Existem diversas informações a respeito dos critérios de recomendação de calagem, mas essas são baseadas em trabalhos de pesquisa para a Região Sul do Brasil.

Embora para o estado Minas Gerais não haja pesquisas realizadas com calagem superficial e sem incorporação para solos cultivados sob SPD, algumas recomendações de dosagem se baseiam em pesquisas realizadas para outros estados. No Boletim para o estado de Minas Gerais (ALVAREZ, 1999) é proposto que quando a amostragem se referir à camada de 0,00 a 0,20 m, a dose do calcário seja diminuída em 1/3 da dose calculada pelo Método de Minas. Por sua vez, quando a amostragem for realizada na camada de 0,00 a 0,10m, a quantidade recomendada seja reduzida pela metade (LOPES, 1999).

Nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, a Comissão de Fertilidade do Solo dos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina recomenda reduzir a dose pela metade, utilizando-se o método SMP e fazendo a amostragem na camada de 0,00 a 0,10 m (WIETHÖLTER, 2004).

Para o estado do Paraná, Caires (2013) indica que o método mais adequado para recomendação de calcário superficial sob solos em SPD é o método de elevação de saturação por bases a 70%. Porém, ressalta a importância do diagnóstico para aplicação, a qual deve ser realizada apenas para solos com pH (CaCl_2) menor que 5,6 ou saturação por bases inferior a 65% na camada de 0,00 a 0,05 m.

A recomendação oficial do estado do Paraná é a mais atualizada no Brasil, e está fundamentada em diversas pesquisas realizadas para as condições daquele estado. Essa recomendação é baseada no método de elevação da saturação por bases, considerando a amostragem de 0,00 a 0,20 m; sendo que toda a dose necessária calculada pelo método da saturação por base, deve ser aplicada em uma única vez, sem parcelamento (PAVINATO *et al.*, 2017). Entretanto, as características dos solos e do clima do estado do Paraná, favorecem, em especial, a presença de maiores teores de MO no solo, a qual está relacionada à mobilidade do calcário, devendo ser importante pesquisas regionais e que considerem maior número de variáveis para o cálculo da dose correta.

2.4 Eficiência da calagem na superfície

A recomendação da calagem para corrigir a acidez do solo sob SPD ainda demanda muita pesquisa experimental, pois envolve grande número de variáveis que interferem na sua eficiência. Para isto, deve-se investigar um conjunto de fatores que influenciam a mobilidade do calcário e seus efeitos no perfil do solo, dentre eles: sistema de produção; características físico-químicas do solo; condições regionais de clima; presença e dinâmica da MO como a mineralização e o poder tampão; adubação com fontes nitrogenadas, além da composição química e física do calcário aplicado.

A grande maioria dos estudos existentes sobre a eficiência da correção da acidez com a aplicação de calcário superficial foi realizada para a região Sul do país (SÁ, 1995; OLIVEIRA, PAVAN, 1996; POTTKER, 1998; CAIRES *et al.*, 2000; MOREIRA *et al.*, 2001; CAIRES *et al.*, 2008; GATIBONI, 2003; DOS SANTOS, 2018; MELINSKI, 2020). Para as demais regiões brasileiras, há poucos trabalhos (CAMBRI, 2004; SCHONINGER, 2010; DA COSTA, 2016; BOSSOLANI, 2021). Por outro lado, existem poucos trabalhos para o cerrado que consideram a composição química do calcário para estudo da mobilidade deste no perfil do solo.

De acordo com alguns trabalhos consultados, a aplicação de calcário na superfície em SPD pode proporcionar correção das camadas superficiais e subsuperficiais (OLIVEIRA, PAVAN, 1996; CAIRES *et al.*, 2000; RHEINHEIMER *et al.*, 2000; CAIRES *et al.*, 2008; CAIRES, 2013). Caires *et al.* (2000) observaram um aumento significativo no pH e saturação por bases (V%) tal como, a redução significativa da acidez potencial até a profundidade de 0,60 m depois de 60 meses da aplicação do corretivo. Porém, seu efeito em profundidade está relacionado a diversos fatores como as condições físicas do solo favoráveis ao deslocamento e

a mobilidade por formas orgânicas ou inorgânicas relacionadas aos aspectos químicos do solo e do corretivo.

Outros trabalhos como os de Caires *et al.* (2000, 2008), em que a aplicação de calcário sob a superfície proporcionou melhorias nas camadas subsuperficiais. No entanto, os efeitos nas camadas inferiores são demorados, como mostrado por Cambri (2004), nos seis meses após aplicação, com experimento no qual foram observadas alterações nos atributos químicos do solo apenas na camada de 0,00 a 0,05 m. Alterações abaixo desta camada superficial só foram ser aferidas após avaliações de 18 e 30 meses. Esses fatos sugerem a importância de se ter um sistema dinâmico, com aplicações frequentes de calcário em superfície para garantir a mobilidade desse corretivo.

Acredita-se que há grande influência dos sistemas de produção na resposta à aplicações superficiais de calcário, sem incorporação, bem como influência do regime hídrico, condições físicas do solo e teores de MO, que podem favorecer, ou não, a mobilidade deste (CAIRES, 2013). Devido a diversidade dos fatores relacionados à resposta às doses de calcário aplicadas em superfície, é necessário que realizar novos trabalhos em outras regiões. Um exemplo foi o que fizeram Pavinato *et al.* (2017) no 'Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná', fornecendo maiores informações para os produtores desse estado.

Em geral, no cerrado, devido a presença de materiais de origem com argilas de baixa atividade, é fundamental o foco no aumento da MO do solo, a qual é responsável, em média, por 88% da capacidade de troca de cátions (CTC) do solo neste bioma (SOUZA; LOBATO; 2002). Juntamente com o aumento da MO, a prática da correção da acidez do solo no SPD é essencial para maior resiliência deste sistema devido à acidificação. Por isso, é importante atentar para aplicações periódicas de corretivos, para que a produtividade agrícola não seja afetada (BESEN, 2020). Um dos aspectos importantes relacionados a eficiência da aplicação de corretivos em superfície, está relacionado à complexidade do SPD adotado em cada talhão, o qual está diretamente relacionado à capacidade de produção de MO, a qual tem efeitos diretos na eficiência da correção do solo (VITTI, 2009).

Em relação à mineralização da MO, pode-se observar uma potencialização do processo, promovida pelo calcário devido um maior desenvolvimento da microfauna do solo, o que implica maior produção de CO₂. Com o aumento da pressão parcial de CO₂ (pCO₂), há um aumento da solubilidade do calcário e, conseqüentemente, maior formação de íons, os quais poderão formar pares iônicos com as bases, arrastando-as no perfil do solo, auxiliando na mobilidade das bases antes ligadas a carbonato (SALOMONS; MOOK, 1976).

Outro aspecto relacionado à importância da MO é o seu poder tampão, devido a grande quantidade de íons H^+ adsorvidos nos grupos carboxílicos e fenólicos, favorecendo a permanência do pH do solo nas camadas superiores nos níveis adequados às culturas, mesmo quando se faz aplicações superficiais de calcário (ALLEONI, 2005). Pois, a quantidade de íons H^+ presente na solução do solo é pequena. Estima-se que apenas $5,0 \text{ kg ha}^{-1}$ de calcário seria suficiente para neutralizar a acidez ativa de qualquer solo, por mais ácido que seja, caso não existisse o poder tampão (ERNANI, 2008).

Deve-se considerar ainda, que a manutenção da palha sob a superfície dos solos no SPD, conhecida como MO leve, ou seja, aquela que não sofreu processo de humificação, contribui para manter a temperatura e a umidade no solo, favorecendo a solubilização do calcário. Este fato, também contribui positivamente com a fauna e a microbiota, a qual, juntamente com os canalículos formados pelas raízes mortas das culturas, podem ajudar na movimentação física do calcário no perfil.

A mobilidade do calcário no solo é lenta e é maior, quanto maior o tempo após a aplicação, sendo favorecido no SPD principalmente pelos bioporos e canais preferenciais do solo, mostrando a alta relação da dinâmica do sistema de rotação de produção, na mobilidade do calcário, assim como quanto maior a dose de calcário, mais profundo será seu efeito na correção da acidez do solo, pois a calagem em doses mais elevadas forma uma frente de alcalinização que pode corrigir a acidez do subsolo (OLIVEIRA; PAVAN; 1996; RHEINHEIMER *et al.*, 2000; TANG *et al.*, 2003; CONYERS *et al.*, 2003; CALEGARI *et al.*, 2013; CAIRES *et al.*, 2015; RODRIGHERO *et al.*, 2015).

Outros aspectos referentes à mobilidade do calcário estão relacionados à parte química do solo. Em relação ao pH do solo, sabe-se que sua reação de dissolução e, por consequência, ação no perfil do solo, é diminuída de acordo com valores de pH mais altos, sendo que em valores acima de 6,0 pH (H_2O) não ocorre sua solubilização, favorecendo sua concentração na superfície do solo (ALLEN; HOSSNER, 1991).

Além desses aspectos, alguns autores acreditam que a mobilidade do calcário pode ser favorecida pela reação de nitrificação após a solubilização de fontes nitrogenadas. Essas geram íons de H^+ que contribuem na dissolução do calcário, além da formação de pares iônicos com o nitrato, que percolam o perfil do solo. De todas as fontes de fertilizantes nitrogenados, o sulfato de amônio, além de possuir um alto potencial de acidificação, teria maior poder de formação de par iônico de sulfato com Ca^{2+} e Mg^{2+} , conforme observado por Rosolem (2003). Este autor verificou que, com o aumento das concentrações dos ânions sulfato e nitrato, houve redução dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} na camada superficial, devido à lixiviação.

A contribuição da adubação nitrogenada para a mobilidade do calcário não foi observada em trabalho realizado por Haliski (2015). Diferentes doses de fertilizantes não afetaram a mobilidade de calcário aplicado superficialmente, após 3, 6 e 9 anos de cultivo. A partir dessas observações, reforça-se a necessidade e importância de se ter experimentos regionais para entender as diversas variáveis envolvidas no processo de mobilidade do calcário.

Outras questões que devem ser consideradas quanto a correção do solo e a mobilidade do calcário no perfil do solo, são as características físicas e químicas dos corretivos. Dentre elas, se mostram muito importantes a granulometria ou reatividade (RE) e o poder de neutralização (PN), características que determinam o Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT) do corretivo, resultado do produto das duas variáveis sobre 100, sendo estas referências geradas em porcentagem, ou seja, $PRNT = (RE \times PN) / 100$.

A RE indica a granulometria do calcário, sendo determinada pela quantidade de material passante em cada uma das peneiras, para o material retido na peneira ABNT nº 10 (2 mm), 20% para o material retido na peneira ABNT nº 20 (0,84 mm), 60% para o material retido na peneira ABNT nº 50 (0,30 mm) e 100% para o material que passa na peneira ABNT nº 50. Por sua vez, o poder de neutralização está relacionado à capacidade de neutralização da composição química daquele corretivo em equivalência de carbonato de Ca^{2+} (LOPES, 1991; CAIRES, 2016).

Em termos práticos, o PRNT é o percentual teórico do calcário que irá reagir em três meses para aplicações com incorporação, desde que tenha umidade no solo, já o residual do calcário que irá reagir após esse período se dá pela diferença entre os valores de PN e PRNT. Logo, isto traz como visão, algumas estratégias para as mineradoras, podendo moer mais fino o calcário e, assim, promover um rápido aumento do pH e redução do teor de alumínio no solo (ALVAREZ *et al.*, 2010). Ou, por outro lado, fazer a produção de calcários com granulometria maior e ter maior residual, podendo ser uma boa estratégia para áreas de instalação das culturas (QAUGGIO, 2000). Em relação as percentagens de Ca^{2+} e Mg^{2+} do calcário, percebe-se que há uma tendência de maior concentração de Ca^{2+} na superfície em relação ao Mg^{2+} devido ao primeiro possuir uma energia de ligação mais forte que as cargas negativas do solo, em comparação com o segundo, promovendo uma menor percolação do Ca^{2+} no perfil do solo, levando a concluir que calcários com maior concentração de Mg^{2+} poderiam ter uma maior mobilidade no perfil (BLOSS, 1971; PAULETTI, 2020).

No campo, muitos produtores e técnicos vêm tomando a decisão de reabertura de áreas sob SPD e incorporação do corretivo, justificada pela maior solubilização do calcário. Porém, pode ocorrer diversos prejuízos a esse sistema de produção, devido à ‘queima’ (mineralização) da MO construída ao longo dos anos. Este fato foi observado por produtores e técnicos devido

ao desenvolvimento vegetativo mais vigoroso, causando uma falsa impressão que a reabertura de novas áreas deveria ser adotada, porém, isto pode ser explicado apenas pelo fornecimento mais acelerado dos nutrientes mineralizados pela incorporação da MO (LEITE, 2018). No entanto, é muito importante o correto diagnóstico de reabertura de áreas em SPD, levando em consideração a análise estratificada da camada de 0,00 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m, quantidade de alumínio no perfil do solo e o histórico de produtividade da área, pois a incorporação do corretivo em áreas estabelecidas pode ser uma boa escolha em alguns casos, porém, deve ser a última opção, devido a importância e dificuldade de construção de MO. Conforme resultados obtidos por Fidaslki *et al.* (2015), a produtividade das culturas de soja e milho, em áreas sob SPD, não foram modificadas com a incorporação de doses de calcário para elevação do V% para 70%, em relação à aplicação superficial.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

Os experimentos de campo foram realizados em quatro locais, sendo instalados de forma independente em áreas agrícolas localizadas em municípios do estado de Minas Gerais (TABELA 1). O presente trabalho, que é parte do projeto que será continuado por cinco anos, refere-se às avaliações das safras 2019/2020 e 2020/2021 compreendendo três cultivos.

Tabela 1 - Localização e altitude das áreas agrícolas utilizadas nos experimentos.

Local	Fazenda	Município/Estado	Mesorregião	Coordenadas	Altitude (m)
I	3W Agronegócios	Carrancas/MG	Campo das Vertentes	-21.554092, -44.762419	1017
II	Estiva II	São João Del Rei/MG	Campo das Vertentes	-21.313834, -44.400888	1002
III	Mato Verde	Ingai/MG	Campo das Vertentes	-21.485605, -44.808556	950
IV	Rocinha	Uberlândia/MG	Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba	-19.101176, -47.979345	886

Fonte: Do autor (2021)

A escolha dessas quatro áreas se deu após avaliação prévia dos atributos químicos dos solos, por meio de coleta estratificada de 0,0-0,10 m; 0,10-0,20 m; e 0,20-0,40 m (TABELA 2). Todas as áreas encontravam-se sob cultivo sob SPD, há três, onze, seis e dez anos, para os locais I, II, III e IV, respectivamente. Os três locais da mesorregião do Campo das Vertentes adotam no seu sistema de produção sucessões de culturas muito similares, sendo as principais, soja/trigo, milho/feijão, soja/milho e feijão/milho. Por sua vez, o local IV, na Mesorregião Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, possui um sistema de rotação com as culturas soja/milho, soja/sorgo, soja/pousio ou soja/girassol. Na safra anterior à instalação do experimento (2018/2019) foram cultivados soja e trigo local I; soja e milho, local II; milho e feijão local III; milho verão e pousio, local IV.

Para as coletas das amostras de solo, seguiu-se as recomendações para SPD do "Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná" (NEPAR, 2018). Determinou-se os valores de pH, teores de MO, P, K, Ca, Mg, S, Al e micronutrientes (Cu, Fe, Mn, Zn e B), de acordo com procedimentos descritos por Silva (2009). As extrações de P, K, Na, Fe, Zn, Mn e Cu foram feitas com o extrator Mehlich-1; Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} pelo KCl 1 mol L⁻¹ e B foi extraído por água quente. Também foi determinada a composição granulométrica dos solos (TABELA 3).

Tabela 2 - Propriedades químicas dos solos antes da instalação dos experimentos, em diferentes profundidades.

Prof.	pH	P (Mehlich-1)	K	Ca	Mg	Al	H+Al	T	V	MO	B	Cu	Fe	Mn	Zn
m	(CaCl ₂)	mg dm ⁻³	cmolc dm ⁻³			%				mg dm ⁻³					
Local I															
0,00-0,10	5,2	7,5	0,3	1,8	0,6	0,1	2,5	5,3	52,3	2,6	0,3	0,7	48,7	4,0	1,2
0,10-0,20	4,9	10,0	0,2	1,7	0,6	0,1	2,7	5,3	48,5	2,4	0,3	0,8	50,0	4,2	1,3
0,20-0,40	4,7	2,5	0,1	1,1	0,4	0,2	2,7	4,5	37,8	2,3	0,3	0,6	46,2	1,9	0,6
Local II															
0,00-0,10	5,4	10,0	0,3	3,1	1,0	0,2	2,4	7,0	65,0	3,8	0,4	0,7	31,4	8,9	3,4
0,10-0,20	4,8	5,6	0,1	1,7	0,5	0,2	3,0	5,5	43,9	2,8	0,8	0,7	35,0	4,8	2,2
0,20-0,40	4,6	1,4	0,2	1,6	0,5	0,1	2,3	4,7	50,1	2,4	0,4	0,7	32,9	4,1	1,6
Local III															
0,00-0,10	5,0	27,0	0,4	2,1	0,5	0,1	2,9	6,0	54,2	3,6	0,3	0,9	34,2	8,5	3,5
0,10-0,20	4,7	10,8	0,3	1,2	0,4	0,1	3,6	5,6	34,5	2,9	0,3	1,1	35,5	3,6	1,3
0,20-0,40	4,5	3,6	0,2	1,0	0,3	0,1	2,8	4,4	34,4	2,8	0,3	1,1	34,7	4,2	1,1
Local IV															
0,00-0,10	4,8	4,4	0,1	2,1	0,6	0,2	1,8	4,8	61,0	1,7	0,3	0,8	46,2	20,4	1,6
0,10-0,20	4,8	1,3	0,1	1,5	0,4	0,2	2,1	4,3	48,8	1,3	0,2	0,9	55,7	10,5	1,2
0,20-0,40	4,4	4,4	0,4	1,0	0,2	0,2	2,1	3,9	43,6	1,3	0,2	1,0	30,4	14,6	3,0

Fonte: Do autor (2021)

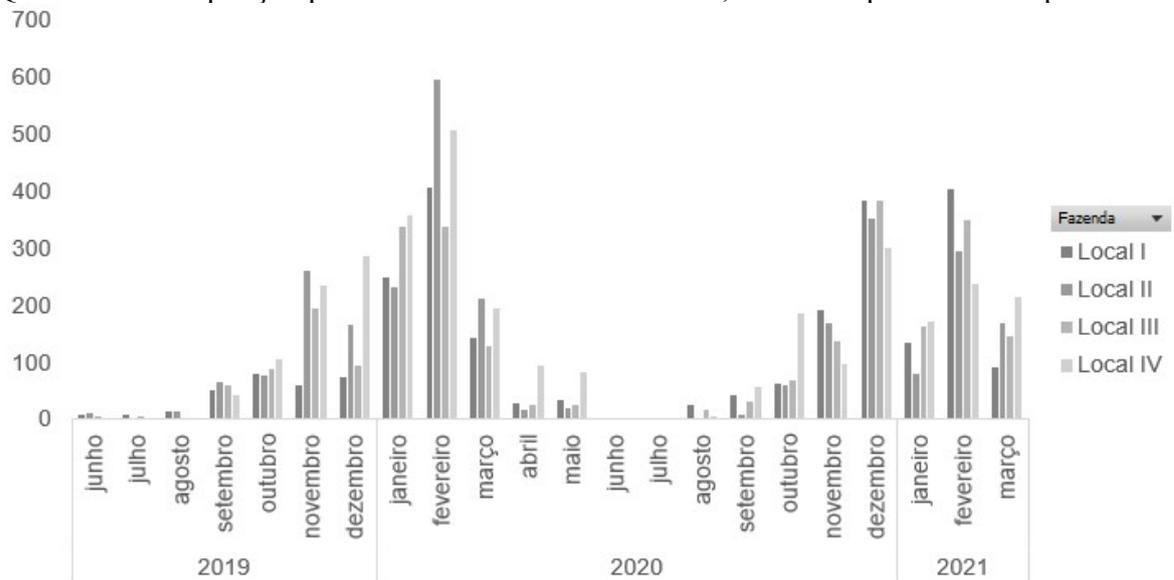
Tabela 3 - Análise de textura do solo em diferentes profundidades, em cada local.

Prof. m	Argila -----g kg-1 -----	Areia	Silte	Classificação textural
Local I				
0,00-0,20	422	382	196	Argilosa
0,20-0,40	420	432	148	Argilosa
Local II				
0,00-0,20	517	169	314	Argilosa
0,20-0,40	617	144	239	Muito argilosa
Local III				
0,00-0,20	410	363	227	Argilosa
0,20-0,40	460	367	173	Argilosa
Local IV				
0,00-0,20	207	647	146	Franco argilosa-arenosa
0,20-0,40	220	663	117	Franco argilosa-arenosa

Fonte: Do autor (2021)

No Quadro 1 são apresentadas as precipitações pluviométricas mensais em cada uma das áreas, registradas desde a instalação do experimento até à colheita da safra do segundo ano agrícola, compreendendo o período de junho de 2019 a março a de 2021.

Quadro 2 - Precipitação pluviométrica mensal nos locais, durante o período do experimento.



Fonte: Estações Meteorológicas dos locais I, III e IV e rede do INMET (Estação São João Del Rei) para o local II.

Os experimentos foram conduzidos em delineamento em blocos ao acaso (DBC) com quatro blocos e seis tratamentos, sendo cinco doses de calcário (0, 2, 4, 6 e 8 Mg ha⁻¹) aplicadas

em superfície sem incorporação, e uma parcela adicional com aplicação de 8 Mg ha⁻¹, com incorporação do corretivo, totalizando 24 parcelas em cada um dos locais.

As parcelas de cada experimento corresponderam à área de 10 metros de largura (correspondente a duas passadas do distribuidor de calcário) por 20 metros de comprimento. O calcário foi distribuído pelo equipamento Bruttus®, para que houvesse menor deriva e perda do corretivo durante a implantação dos experimentos. O tratamento de calcário com incorporação, simulando a reabertura da área, foi realizado com duas passadas de grade de 32” com posterior acerto do terreno com duas passadas de grade niveladora.

O calcário aplicado nos locais II, III e IV apresentou reatividade (RE) de 90%, poder de neutralização (PN) de 109%, poder relativo de neutralização total (PRNT) de 98%, teor de óxido de Ca²⁺ (CaO) de 35%, e de óxido de Mg²⁺ (MgO) de 16%. Por sua vez, o calcário utilizado no local I, apresentou RE de 89%, PN de 99%, PRNT de 88%, teor de CaO de 37% e de MgO de 15%. O calcário foi aplicado em 15/08/2019, 22/09/2019, 04/10/2019 e 25/05/2019, nas fazendas, I, II e III, IV respectivamente.

Nas áreas experimentais foram utilizadas as mesmas cultivares/híbridos de milho, soja, feijão e milheto, bem como o mesmo manejo de adubação, plantas daninhas, pragas e doenças, adotados pelos produtores. Não foram feitas aplicações de gesso ou demais fontes de Ca²⁺ e Mg²⁺ via solo, para se evitar interferências externas à variável analisada (calcário).

As datas de semeadura e coleta de folhas, descrição da cultura, cultivar e adubação estão representadas na Tabela 4. Todas as culturas nas três safras avaliadas foram semeadas com espaçamento de 0,5 m entre linhas, exceto no local II a qual adota como espaçamento padrão 0,6 m. Na Tabela 4 na coluna ‘Cultura’, algumas possuem o símbolo (x), que se refere a impossibilidade de realizar as avaliações dos caracteres agrônômicos das mesmas, devido a problemas de manejo agrônômicos do produtor rural na condução da culturas, como alta infestação de plantas daninhas e baixa qualidade no estabelecimento, o que afetaria os resultados de produtividade e os componentes agrônômicos, porém, que não afetam os caracteres relacionados ao solo.

No primeiro ano, as amostragens de solo nas fazendas 3W Agronegócios (local I); Estiva II (local II); Mato Verde (local III); e Rocinha (local IV) foram realizadas após 6, 13, 6 e 9 meses das instalações dos experimentos, respectivamente. Em relação à análise de solo no segundo ano, após a colheita da safra verão 2020/2021, a mesma foi realizada para os locais I, II, III e IV 17, 18, 18 e 22 meses, após a aplicação das doses de calcário, respectivamente. Por sua vez, a pluviosidade acumulada entre as duas coletas de solo foi de 1.547, 1.176, 1.173, 1.649 mm, respectivamente.

A precipitação pluviométrica registrada desde as instalações dos experimentos até as primeiras coletas de solo, foram de 938, 1.610, 1.351 e 1.540 mm, para os locais I, II, III e IV, respectivamente. O total acumulado de chuva após a implantação do experimento foi de 2.485, 2.786, 2.524, 3.189 mm, para os locais I, II, III e IV, respectivamente.

Tabela 4 - Dados de cultivo de cada uma das safras em cada um dos locais, durante o período experimental de 2019 a 2021.

Safra	Cultura	Cultivar/híbrido	Data plantio	Coleta folhas	Colheita	Adubação pré plantio	Adubação de Plantio	Adubação de Cobertura
Local I								
19/19	Soja	BMX Lança	02/10/2019	13/11/2019	01/02/2020	220 kg.ha ⁻¹ KCl	170 kg.ha ⁻¹ (11-52-00)	-
20/20	Milho (x)	M30A37	15/02/2020	-	-	-	220 kg.ha ⁻¹ (13-33-00 S15)	250 kg.ha ⁻¹ (45-00-00)
20/21	Feijão	VR-20	19/10/2020	03/12/2020	14/01/2021	300 kg.ha ⁻¹ KCl	200 kg.ha ⁻¹ (13-33-00 S15)	200 kg.ha ⁻¹ (45-00-00)
Local II								
19/19	Milho	P 2501 conv.	23/10/2019	29/12/2019	10/03/2020	150 kg.ha ⁻¹ KCl	200 kg.ha ⁻¹ (11-52-00)	400 kg.ha ⁻¹ (45-00-00)
20/20	Feijão	Esteio	13/03/2020	-	27/06/2020	150 kg.ha ⁻¹ KCl	150 kg.ha ⁻¹ (11-52-00)	130 kg.ha ⁻¹ (45-00-00)
20/21	Milho	P 3016 VYHR	26/10/2020	06/01/2021	22/03/2021	300 kg.ha ⁻¹ KCl	330 kg.ha ⁻¹ (13-33-00 S15)	560 kg.ha ⁻¹ (45-00-00)
Local III								
19/19	Milheto (x)	ADR 300	18/10/2019	-	-	-	-	-
20/20	Milho	P 3707	16/01/2020	22/03/2020	13/06/2020	150 kg.ha ⁻¹ KCl	200 kg.ha ⁻¹ (13-33-00 S15)	-
20/21	Feijão (x)	VR-20	26/10/2020	08/12/2020	-	160 kg.ha ⁻¹ KCl	240 kg.ha ⁻¹ (11-52-00)	230 kg.ha ⁻¹ (30-00-00)
Local IV								
19/19	Soja	NS 7300 IPRO	23/10/2019	07/12/2019	14/02/2020	150 kg.ha ⁻¹ Aspire (00-00-58)	310 kg.ha ⁻¹ (05-37-00)	-
20/20	Milho	NS 73 Vip3	23/02/2020	-	21/07/2020	-	270 kg.ha ⁻¹ (13-33-00 S15)	500 kg (25-00-25)
20/21	Milho (x)	30F53	24/10/2020	27/12/2020	-	260 kg.ha ⁻¹ Aspire (00-00-58)	250 kg.ha ⁻¹ (13-33-00 S15)	230 kg.ha ⁻¹ (45-00-00)

Fonte: Do autor (2021)

3.2 Avaliações

3.2.1 Coleta de folhas e análise foliar

Na época do florescimento das culturas da primeira safra foram coletadas folhas de milho, soja e feijão para a determinação das concentrações foliares de nutrientes, de acordo com procedimentos descritos por Malavolta *et al.* (1997). As folhas de milho foram coletadas no estágio R1 (emissão da inflorescência feminina), retirando-se toda a folha e coletando-se sempre a folha oposta e abaixo da espiga. As folhas de soja foram coletadas no estágio R2 (florescimento pleno), retirando-se toda a folha, com pecíolo, colhendo sempre o terceiro trifólio de cima para baixo na haste principal. As folhas de feijão foram coletadas no estágio R6 (floração - primeira flor aberta), sendo coletado o terceiro trifólio com pecíolo de cima para baixo. Para todas as culturas, em cada uma das unidades experimentais, foram coletadas dez folhas de diferentes plantas da parcela.

Após a coleta, o material vegetal foi seco em estufa com circulação de ar forçada, com temperatura entre 60 a 65 °C, até atingir massa constante, posteriormente, foi moído em moinho tipo Willy, usando-se peneira granulométrica de 20 Mesh (ASTM 20 mesh/tyler 20, abertura 0,85mm).

Nas amostras de folha foram determinados os teores de N, P, K, S, Ca, Mg, Mn, Zn, B, Cu e Fe, após digestão ácida do material seco conforme métodos descritos por Malavolta *et al.* (1997). Na preparação dos extratos, foi utilizado digestão nitro-perclórica para P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn, Zn e Al. Para N e B, foi utilizada digestão sulfúrica e digestão por via seca, respectivamente.

3.2.2 Caracteres agronômicos e produtividade

Para avaliar a produtividade das culturas, foi realizada a colheita de 3 linhas centrais ao longo de 5 metros por parcela. Após a colheita houve o processamento em trilhadora vertical de parcelas, e, em seguida, procedeu-se de modo manual a limpeza de impurezas com abanação com peneiras. Posteriormente, foi realizada a avaliação de umidade e peso dos grãos colhidos para conversão para produtividade por hectare (10.000m²) e a 13% de umidade.

Foi realizada a verificação da altura de plantas no momento da colheita, para as culturas de soja, feijão e milho, por meio de régua graduada, com a avaliação de 5 plantas aleatórias no

centro da parcela. Para as duas primeiras culturas a altura foi feita rente ao solo até o último nó, já para a cultura do milho, foi realizada do solo até a folha bandeira.

Por sua vez, a massa de 100 grãos foi feita no mesmo dia da produtividade para se ter como base a mesma umidade, e foi contado de forma manual, 100 grãos de cada parcela. A cultura do milheto foi utilizada para produção de palhada e cobertura do solo e, por essa razão, não foram feitas avaliações nessa cultura.

3.2.3 Análise de solo

Após as colheitas das culturas de verão de cada ano do período avaliado, foram realizadas amostragens de solo, em todas as parcelas experimentais, nas camadas de 0,00 a 0,10 m, de 0,10 a 0,20 m, e de 0,20 e 0,40 m por meio de trado holandês e com a coleta de cinco amostras simples, sendo três amostras na entrelinha da cultura e duas na linha cultura, para compor a amostra composta da parcela. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos identificados e encaminhados para o laboratório, onde foram secas em estufas de circulação forçada com temperatura não superior a 40 °C, posteriormente passadas em peneira de malha 0,002 m. Após a preparação das amostras coletadas, foram determinados os teores dos nutrientes.

Na camada de 0,00 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m foram determinados os valores de pH, teores de MO, P, K, Ca, Mg, S, Al e micronutrientes (Cu, Fe, Mn, Zn e B). No caso das camadas de 0,2 a 0,4 m, foram determinados os valores de pH, os teores de MO, P, K, Ca, Mg, S e Al. O valor de pH foi obtido utilizando o pHmetro, já os demais componentes foram quantificados com espectrofotômetro de plasma. Todos os procedimentos foram realizados de acordo com as metodologias de Silva (2009).

Para a análise de textura, foram coletadas amostras nas profundidades de 0,00 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m, utilizando-se um trado holandês. As coletas foram realizadas em outubro e novembro no início da safra de verão 2019/2020. As amostras foram secas ao ar e depois peneiradas em malha 2 mm. Para determinação da textura, adicionou-se em uma garrafa 10 g do solo peneirado, 10 ml de NaOH e 100 ml de água destilada. A solução ficou em agitação por 16 horas a 30 rpm, no agitador de Wagner. Posteriormente, passou-se o material pela peneira de malha 0,053 mm e, logo em sequência, foi transferido para uma proveta de 500 mL. O material que ficou retido na peneira foi transferido para um béquer e, em seguida, para uma estufa a 105 °C por 24 horas, e depois foi pesado. Após a sedimentação do material na proveta, por tempo determinado através da temperatura da solução, segundo a lei de Stokes, retirou-se

com o auxílio de uma pipeta, uma alíquota de 10 ml da suspensão a uma profundidade de 5 cm. O material coletado foi transferido para um béquer e levado para estufa a 105 °C por 24 horas. Após esse período, pesou-se o material e fez-se o cálculo da textura.

3.2.4 Análise estatística

Todos os dados em função das doses de calcário sem incorporação, foram submetidos à análise de variância e testadas as regressões do 1° e 2° grau. A escolha do melhor modelo de regressão seguiu o critério de significância dos parâmetros ($p < 0,05$) e, posteriormente, critério de informação de Akaike (AIC), no qual o menor valor apresenta o melhor ajuste dos dados. Em sequência, para as variáveis que tiveram ajuste de regressão, foi feito um contraste de médias usando o Teste de Dunnett ($p < 0,05$), onde o controle foi a dose de 8 Mg ha⁻¹ com incorporação. Já para as variáveis em que não houve ajuste de regressão, foi realizado o teste de agrupamento Scott Knott ($p < 0,05$).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente trabalho, é parte do projeto que será continuado por mais três safras, logo, refere-se à avaliação de 2019/2020 e 2020/2021, compreendendo três cultivos em quatro locais. Inicialmente serão discutidos os efeitos dos tratamentos na correção da acidez, na disponibilidade de cátions básicos e micronutrientes no solo. Posteriormente, serão discutidos os efeitos dos tratamentos nos teores foliares de nutrientes, nos caracteres agronômicos e na produtividade das culturas.

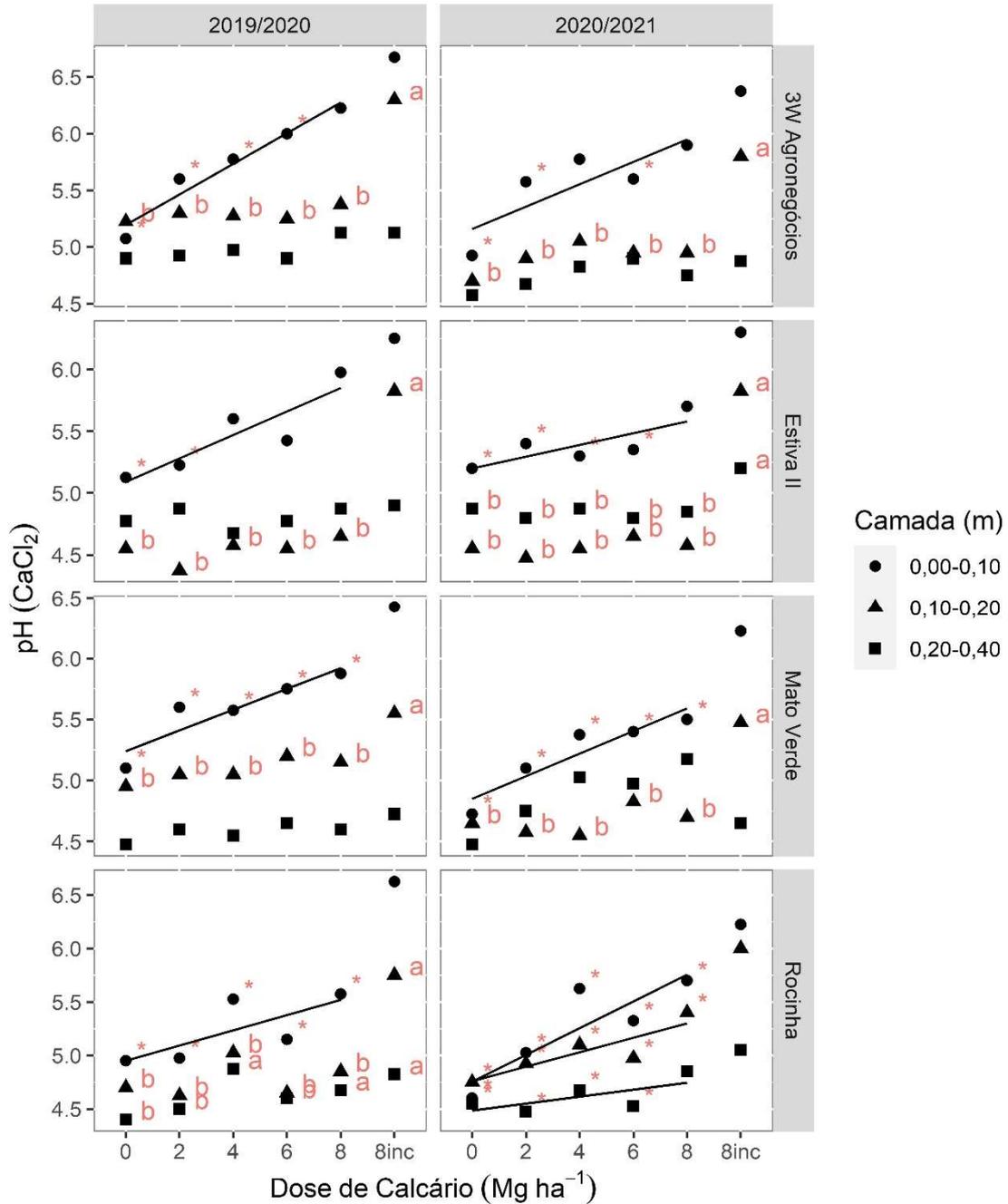
4.1 Efeito das doses de calcário nos atributos químicos dos solos

Inicialmente, serão apresentados os efeitos das doses de calcário nos valores de pH (CaCl_2), teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e H+Al , além da saturação por bases (V%). Todos os modelos estatísticos referentes às variáveis apresentadas em gráficos estão apresentados nas Tabelas do Apêndice A.

4.1.1 pH (CaCl_2)

Os valores de pH (CaCl_2) da camada de 0,00 a 0,10 m aumentaram linearmente com as doses de calcário aplicadas em superfície sem incorporação, na safra 2019/2020 (FIGURA 1), resultado previsível, devido a capacidade do calcário elevar o pH do solo. Estes resultados corroboram com os encontrados por diversos autores, os quais também observaram aumentos nos valores do pH da camada superficial do solo, após seis meses de aplicação superficial de calcário em área de SPD (RHEINHEIMER *et al.*, 2000; CAIRES *et al.*, 2002; DA COSTA, 2016; CHAPLA, 2017).

Figura 1 - Variação do pH (CaCl₂) em função da calagem, em quatro locais ao longo de dois anos agrícolas nas profundidades de 0,00 a 0,10m, 0,10 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m.



- Doses com (*) diferem da dose de 8 Mg ha⁻¹ incorporada pelo Teste de Dunnett (p<0,05).
- Letras diferentes diferem pelo teste de agrupamento Scott Knott (p< 0,05).
- 8 inc = Dose de 8 Mg ha⁻¹ com incorporação.

Fonte: Do autor (2021).

No geral, a incorporação do calcário elevou o pH dos solos em relação aos tratamentos sem incorporação em todas as áreas até 0,2 m (FIGURA 1). Na profundidade 0,2 a 0,4 m somente houve efeito após a primeira safra no experimento da fazenda Rocinha e após a segunda safra no experimento da fazenda Estiva II. Por outro lado, Moreira *et al.* (2001) não

observaram diferenças entre os valores de pH das camadas superficiais do solo, quando compararam a dose máxima incorporada e a mesma dose sem incorporação, em duas áreas cultivadas sob SPD no estado do Paraná. No entanto, a dose máxima aplicada nos solos estudados por Moreira *et al.* (2001) foi 3.380 kg ha^{-1} de calcário.

Nos locais III e IV, o tratamento de 8 Mg ha^{-1} , com incorporação diferiu dos demais, para o local I, o contraste foi significativo para todas as doses, exceto a dose de 8 Mg ha^{-1} , sem incorporação. Por outro lado, no local II foi observada diferença estatística apenas para as doses de 0 e 2 Mg ha^{-1} . Isso se deve ao que descreve Sousa e Lobato (2004), que afirmam que, apesar da alta dependência da umidade para reação do calcário no solo, pode-se considerar de forma teórica que, quando este é aplicado sobre a superfície sem incorporação, possui uma reatividade de 20% por ano, tendo efeito residual por até cinco anos sobre os atributos do solo. Por sua vez, o calcário com a incorporação, possui uma reatividade de 50, 30 e 20% no primeiro, segundo e terceiro ano, após a aplicação dos corretivos. Como o calcário é um produto de baixa reatividade, a incorporação é importante para promover o contato entre o corretivo e as partículas do solo e, assim, promover uma reação mais rápida do produto (ALCARDE, 1992).

Em relação à camada de 0,10 a 0,20 m, na safra 2019/2020, não foi observado efeito para as doses aplicadas sem incorporação, possivelmente porque não houve tempo para que o calcário pudesse solubilizar e apresentar mobilidade ao longo do perfil do solo. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Caires (2005), que realizou um experimento em Latossolo sob SPD, com doses crescentes de calcário dolomítico, sendo 0, 2, 4 e 6 Mg ha^{-1} para elevação do V% para 50, 70 e 90%. O autor também observou que a aplicação de calcário elevou os valores de pH da camada de 0,10 a 0,20 m somente a partir de 2,5 anos da aplicação, permanecendo até 10 anos sem novas alterações no perfil.

Em relação à aplicação da dose máxima incorporada, em todos os locais, houve elevação do pH (CaCl_2) em relação a todas as doses aplicadas na superfície, demonstrando a efetividade do processo de incorporação deste corretivo para a camada de 0,10 a 0,20 m.

Com relação aos valores de pH da camada de 0,20 a 0,40 m, não foi observado efeito dos tratamentos sobre os valores de pH (CaCl_2) nos locais I, II e III, no primeiro ano de avaliação. Isso demonstra a baixa profundidade de incorporação do corretivo, mesmo utilizando uma grade de 32". Por outro lado, no local IV, foi observada significância do tratamento incorporado sobre as doses 0, 2 e 6 Mg ha^{-1} . Além disso, houve uma pluviosidade muito elevada durante os meses da safra verão 2019/2020, totalizando 1.540 mm desde a aplicação do calcário até a primeira coleta de solo.

Para finalizar, é importante dizer que o efeito restrito das doses de calcário aplicadas na superfície, somente na camada superficial nas áreas com solos mais argilosos, confirma o que já havia sido observado em vários trabalhos (MOREIRA *et al.*, 2001; CAMBRI, 2004, CAIRES, 2002; 2005; 2008). Isso demonstra a necessidade da avaliação dos atributos do solo, buscando-se trabalhar com a correção nestas áreas, com aplicações mais frequentes, buscando a construção de uma frente de alcalinização (CONYERS *et al.*, 2003; CALEGARI *et al.*, 2013; CAIRES *et al.*, 2015).

Após 17, 18, 18 e 22 meses da aplicação do calcário nos locais os locais I, II, III e IV, houve aumento linear do pH na camada 0,0 a 0,10 m do solo, com o aumento das doses aplicadas em superfície, como observado na primeira avaliação. Em relação ao tratamento incorporado nos locais III e IV, foi observado diferença para todos os demais tratamentos, assim como no primeiro ano. Por sua vez, no local II, registrou-se de forma geral, maior diferença nos valores de pH da camada superficial com a dose incorporada para as demais, se comparada à safra anterior, representada pela menor inclinação da reta, e pelos menores valores absolutos de pH (CaCl₂). No local I, a significância pelo teste de Dunnett ocorreu apenas para as doses 0, 2 e 6 Mg ha⁻¹.

Ressalta-se que em todos os locais foi observado um decréscimo nos valores de pH (CaCl₂), quando se compara os valores com a primeira amostragem. Esse fato pode ser explicado, em parte pelo cultivo de duas safras e pela acidificação natural ocorrida no solo, mesmo sabendo que ainda existe um alto percentual do calcário aplicado em superfície para reagir (LOPES *et al.*, 1991; SOUSA; LOBATO, 2004).

Para a camada de 0,10 a 0,20 m, foi observado efeito linear nos valores de pH com as doses crescentes de calcário aplicadas, sem incorporação somente no local IV. Nesta área, além de possuir textura mais arenosa, ocorreu 3.189 mm de precipitação pluviométrica desde a aplicação do calcário até esta segunda coleta de solo. Por sua vez, em todos os locais, os valores de pH na camada de 0,10 a 0,20 m observados nas parcelas com o calcário incorporado, foram superiores aos observados aos demais tratamentos, apesar de não diferir estatisticamente para a dose de 8 Mg ha⁻¹, aplicadas na superfície dos locais I e II.

Para a profundidade de 0,20 a 0,40 m, nos locais I e III, não houve efeito de nenhum tratamento sobre o pH desta camada. Por sua vez, no local II, observou-se efeito do tratamento incorporado nesta camada, diferindo estatisticamente de todas as demais doses, mostrando uma mobilidade deste corretivo do primeiro para o segundo ano na dose incorporada. No local IV, como observado para as camadas mais superficiais, houve efeito linear das doses de calcário aplicadas nos valores de pH da camada de 0,20 a 0,40 m, demonstrando que neste local, em 22

meses, o calcário foi capaz de ter uma mobilidade de mais de 0,10 m ao longo do perfil do solo, já que no primeiro ano não houve efeito da aplicação na camada de 0,10 a 0,20 m.

No local IV, após a coleta de solo do primeiro ano, foi cultivado milho na segunda safra. Na safra 2020/2021 foi cultivado novamente milho, sendo utilizado 160 e 135 kg ha⁻¹ de N, respectivamente, ambos via ureia, totalizando quase 295 kg de N. Logo, para esta área, com a textura leve, alta pluviosidade, e altas doses de fertilizantes nitrogenados, com valores de pH (CaCl₂) originalmente antes da instalação do experimento de 4,8, 4,8 e 4,4 (TABELA 2) para as camadas de 0,00 a 0,10 m, de 0,10 a 0,20 m e de 0,20 a 0,40 m, respectivamente, foi possível obter elevada percolação do calcário. Conforme afirma Melinski (2020), aumento do pH nas camadas subsuperficiais só ocorre quando o pH(CaCl₂) na camada imediatamente acima atinge valores próximos ou maiores que 5,0. Esse fato foi observado em diversos locais neste experimento; porém, apenas no local IV houve resposta significativa na elevação do pH, possivelmente devido a outros fatores envolvidos na mobilidade do calcário.

4.1.2 Cálcio

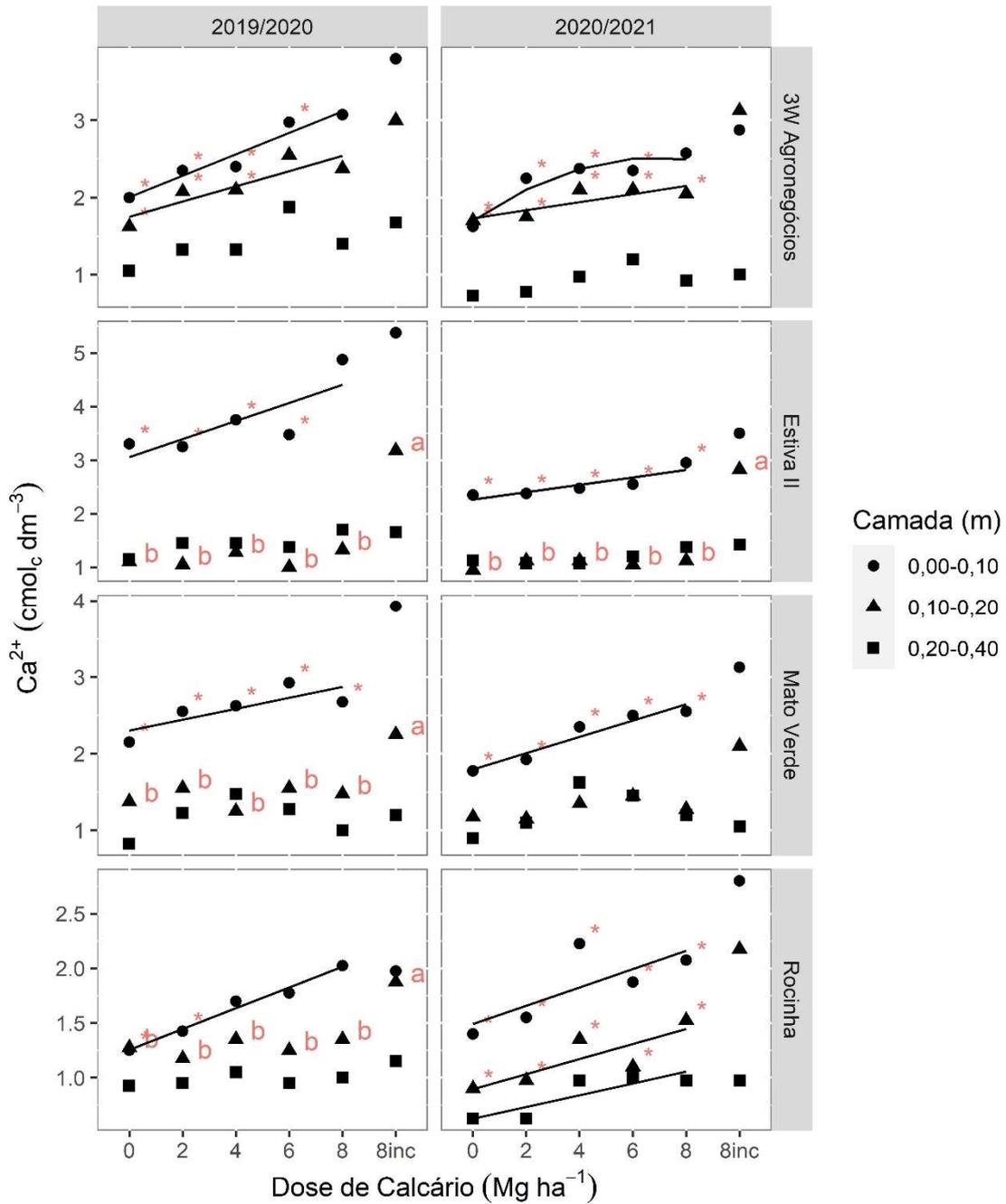
Os teores de Ca²⁺, obtidos na profundidade de 0,00 a 0,10 m, durante a primeira amostragem (safra 2019/2020), aumentaram linearmente com aplicação das doses crescentes de calcário, em todos os locais (FIGURA 2). A incorporação da maior dose (8 Mg ha⁻¹) aumentou os teores de Ca²⁺, comparada ao controle e às doses 2, 4 e 6 Mg ha⁻¹ no local I; ao controle e às doses de 2 e 6 Mg ha⁻¹ no local II; ao controle e às doses 2, 4, 6 e 8 Mg ha⁻¹ no local III; ao controle e à dose de 2 Mg ha⁻¹, no local IV.

Com relação a camada de 0,10 a 0,20 m, houve aumento linear nos teores de Ca²⁺ com as doses aplicadas no local I. Desta forma, pode-se dizer que houve percolação do calcário para esta camada já nos primeiros seis meses após a aplicação. A incorporação do calcário, na dose de 8 Mg ha⁻¹, aumentou os teores de Ca²⁺ apenas em relação às doses 0, 2 e 4 Mg ha⁻¹, aplicadas em superfície, sem incorporação. Esses resultados obtidos neste local, sugerem que, quanto maior a dose aplicada na superfície, maior será seu efeito ao longo do tempo nas camadas inferiores do solo, conforme observado por outros autores (PETRERE, 2001; MELINSKI, 2020). Após 42 meses da aplicação do corretivo, Petrere (2001) observou alteração dos teores de Ca²⁺ nas camadas subsuperficiais, proporcionais às doses aplicadas.

Conforme já visto por outros autores, deve-se novamente ressaltar que o efeito em profundidade é demorado. Melinski (2020), em experimento conduzido sob Latossolos Bruno, com aplicações crescentes, sem incorporação, observou aumento dos teores de Ca²⁺ na camada

de 0,00 a 0,10 m já nos primeiros cinco meses após a aplicação. Por sua vez, na camada de 0,40 a 0,60 m, somente houve aumento dos teores deste nutriente a partir do terceiro ano de aplicação do corretivo. Vários trabalhos anteriores citados por Caires (2013) já haviam comprovado a correção nas camadas subsuperficiais do solo, com a aplicação de calcário superficial, sem incorporação, mas com necessidade de tempo para esta correção (OLIVEIRA; PAVAN, 1996; RHEINHEIMER *et al.*, 2000; TANG *et al.*, 2003; CONYERS *et al.*, 2003; CAMBRI, 2004; CALEGARI *et al.*, 2013; CAIRES *et al.*, 2015; RODRIGHERO *et al.*, 2015).

Figura 2 - Variação dos teores de cálcio em função da calagem em quatro locais ao longo de dois anos agrícolas nas profundidades de 0,00 a 0,10m, 0,10 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m.



- Doses com (*) diferem da dose de 8 Mg ha^{-1} incorporada pelo Teste de Dunnett ($p < 0,05$).
- Letras diferentes diferem pelo teste de agrupamento Scott Knott ($p < 0,05$).
- 8 inc = Dose de 8 Mg ha^{-1} com incorporação.

Fonte: Do autor (2021).

Nos demais locais II, III e IV, as doses de calcário aplicadas na superfície não alteraram os teores de Ca^{2+} da camada de 0,10 a 0,20 m, conforme também observado por Moreira *et al.* (2001) em duas das três áreas avaliadas. Porém, a maior dose incorporada aumentou os teores de Ca^{2+} , em relação às doses em superfície, em todos os locais. Por sua vez, as doses aplicadas na superfície em todos os locais, bem como a maior dose incorporada, não modificaram os teores de Ca^{2+} na camada de 0,20 a 0,40 m, nesta primeira avaliação.

Na segunda avaliação, em locais II, III e IV, foi possível observar o mesmo comportamento do ano anterior, ou seja, aumento linear dos teores de Ca^{2+} da camada de 0 a 0,10 m, com o aumento de doses aplicadas, sem posterior incorporação. Por sua vez, a incorporação do corretivo provocou aumento dos teores de Ca^{2+} nesses três locais, comparado com todas as demais doses. No local I, foi observado efeito quadrático nos teores de Ca^{2+} nesta camada, podendo ser explicado pela menor reatividade do calcário em solos com alto valor de pH, como ocorreu nas camadas superiores do solo, quando se utilizou as maiores doses de aplicadas sem incorporação.

Na camada de 0,10 a 0,20 m, houve aumento linear dos teores de Ca^{2+} dos solos nos locais I e IV, proporcionais ao aumento das doses aplicadas. Porém, ressalta-se também que, se observou maiores teores de Ca^{2+} com a incorporação do calcário, comparado a todas as doses na superfície, nos solos dos locais I, II e IV. Por sua vez, não houve efeito das doses aplicadas sem incorporação nos teores de Ca^{2+} , nos locais II e III. Diversos autores também não observaram efeito das aplicações de calcário sem incorporação nos primeiros anos, nas camadas subsuperficiais (POTTKER, 1998; MOREIRA, 2001; CAIRES, 2013; PAULETTI, 2014).

No caso da profundidade de 0,20 a 0,40 m, houve variação dos teores em função das doses aplicadas na superfície, sem incorporação apenas no local IV, o qual corresponde à área com menor teor de argila. Pequeno efeito das doses aplicadas na superfície já eram esperados, devido ao pouco tempo entre a aplicação e as avaliações efetuadas, sendo 17, 18, 18 e 22 meses o período entre a instalação do experimento e a segunda coleta do solo. Isso porque a mobilidade do calcário no solo é lenta, e quanto maior a dose de calcário, mais profundo será seu efeito (OLIVEIRA; PAVAN, 1996; RHEINHEIMER *et al.*, 2000; TANG *et al.*, 2003; CONYERS *et al.*, 2003; CALEGARI *et al.*, 2013; CAIRES *et al.*, 2015; RODRIGHERO *et al.*, 2015). Isso demonstra também, a necessidade de uma boa correção do solo, com incorporação do corretivo de forma profunda, antes de se adotar o SPD, conforme discutido por Moreira *et al.* (2018).

4.1.3 Magnésio

Os teores de Mg^{2+} , na profundidade de 0,00 a 0,10 m, durante a primeira amostragem, aumentaram linearmente com aplicação das doses crescentes de calcário, sem incorporação, em todos os locais (FIGURA 3). A incorporação da maior dose (8 Mg ha^{-1}) aumentou os teores de Ca^{2+} , comparada ao controle e às doses 2 e 4 Mg ha^{-1} no local I; ao controle e à dose de 2 Mg ha^{-1} local II; a todos os tratamentos local III e em relação ao controle local IV.

Não houve efeito das doses aplicadas sem incorporação nos teores de magnésio na profundidade de 0,10 a 0,20 m nos locais I e III. Houve aumento dos teores de magnésio nestes locais, apenas quando o corretivo foi incorporado, comparado às demais doses. Por sua vez, no local II, foi observado efeito linear nos teores de magnésio com as doses sem incorporação, mas com valores pouco expressivos, passando de 0,27 para $0,43 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, comparando-se o controle com a dose de 8 Mg ha^{-1} . No local IV, foi observado efeito dos tratamentos sem incorporação nos teores de magnésio já no primeiro ano, passando de 0,34 para 0,58, comparando-se o controle com a dose 0 e 8 Mg ha^{-1} .

Possivelmente, o efeito observado no local II foi devido ao alto teor inicial de magnésio, de $1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, na camada de 0,00 a 0,10 m, o que possivelmente favoreceu sua percolação no perfil. Para o local IV, além de possuir textura mais arenosa, houve precipitação pluviométrica de 3.189 mm desde a aplicação do calcário até esta segunda coleta de solo. Além disso, apresentou inicialmente menores valores de pH ($CaCl_2$) 4,8 para as camadas 0,00 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m, o que facilita a reação inicial do calcário (ALLEN; HOSSNER, 1991; MILLER, 2015; PENN, 2019).

O que governa a mobilidade dos elementos químicos do solo é a sua preferência pela adsorção às cargas do solo, na qual elementos com menor raio iônico e maior carga, têm maior atração pelas cargas do solo, de acordo com a série liotrópica. Nesta ordem o Ca^{2+} pelo seu menor raio iônico hidratado se comparado ao Mg^{2+} , tem preferência na retenção das cargas, e menor percolação (PAULETTI, 2020). O movimento do Mg^{2+} no perfil do solo em muitos casos, também pode ser explicado pela formação de complexos orgânicos hidrossolúveis, a partir de ácidos orgânicos liberados dos restos vegetais presentes na superfície do solo (MIYAZAWA *et al.*, 2002).

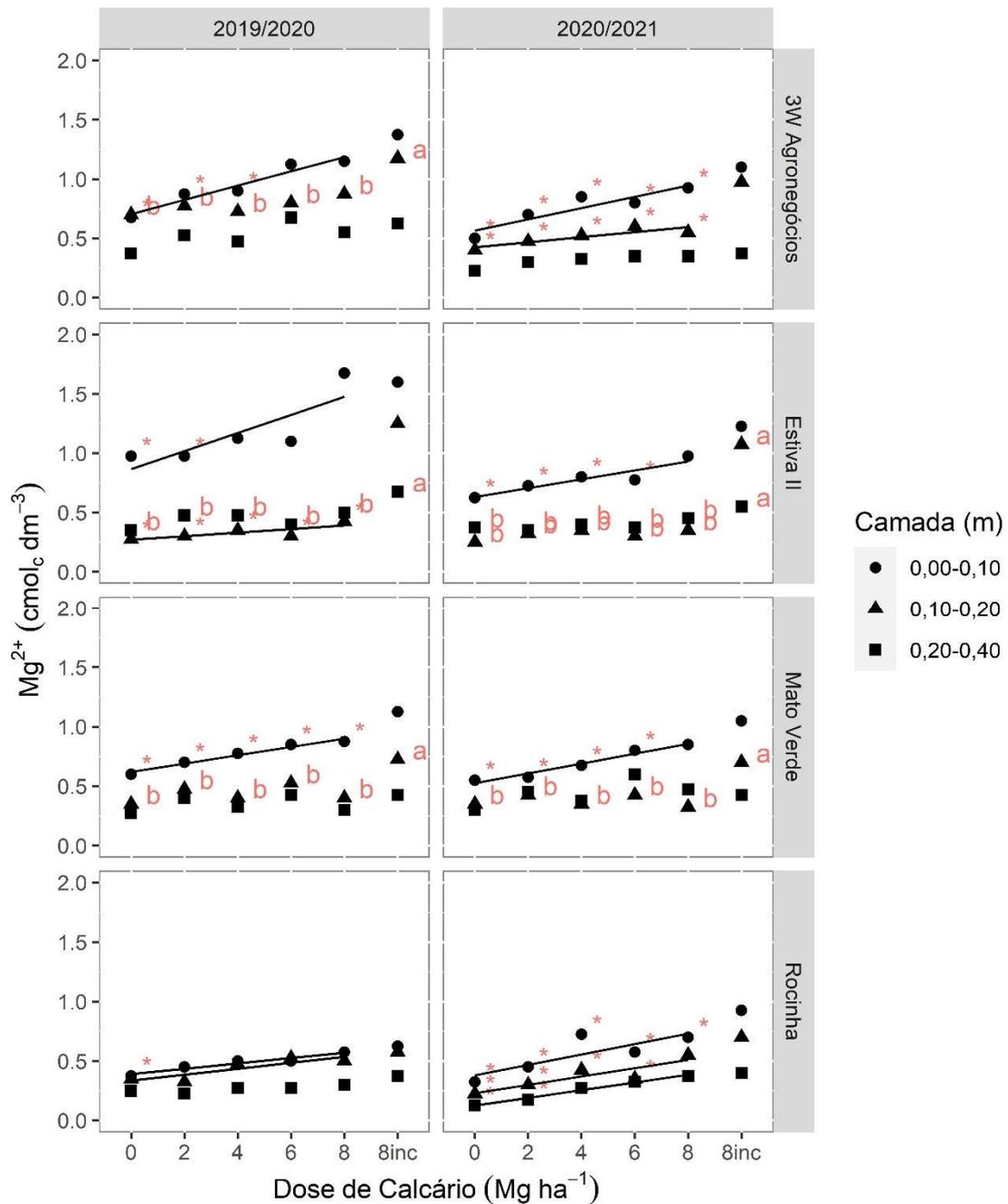
A incorporação da maior dose de calcário aumentou os teores de Mg^{2+} na camada de 0,20 a 0,40 m do solo do local II, comparado aos demais tratamentos, sem incorporação. Para os demais locais, não houve efeito de nenhum tratamento sobre os teores de Mg^{2+} na camada

de 0,20 a 0,40 m, ou seja, nestes locais, a incorporação não foi eficiente para alterar os teores de Mg^{2+} a esta profundidade.

Na segunda amostragem, safra 2020/2021, os teores de Mg^{2+} na profundidade de 0,00 a 0,10 m aumentaram linearmente com o aumento de doses de calcário, em todos os locais. Em relação ao tratamento incorporado, este se diferiu de todas as demais doses nos locais I e IV e das doses 0, 2, 4 e 6 $Mg\ ha^{-1}$ nos locais II e III.

Na profundidade de 0,10 a 0,20 m na segunda amostragem, os teores de Mg^{2+} dos solos dos locais II e III variaram apenas quando foi aplicada a maior dose e incorporada. Com a incorporação, os teores observados foram maiores do que os encontrados com qualquer uma das demais doses sem incorporação. Para os locais I e IV já foi observado resposta linear das doses, sendo que no local I o incremento foi mais suave, podendo ser observado pela menor inclinação da reta (FIGURA 3), mostrando que no local IV, a mobilidade foi mais acentuada, reforçando o observado para os teores de Ca^{2+} e pH (FIGURAS 1 e 2), devido ao menor teor de argila. No local I, o tratamento incorporado se diferenciou de todas as demais doses, enquanto no IV, apenas a aplicação de 8 $Mg\ ha^{-1}$ não diferiu da mesma dose incorporada. Isso mostra que independentemente do local, a incorporação foi mais eficiente na elevação dos nutrientes na profundidade de 0,2 a 0,4 m.

Figura 3 - Variação dos teores de magnésio em função da calagem em quatro locais ao longo de dois anos agrícolas nas profundidades de 0,00 a 0,10m, 0,10 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m.



- Doses com (*) diferem da dose de 8 Mg ha^{-1} incorporada pelo Teste de Dunnett ($p < 0,05$).
- Letras diferentes diferem pelo teste de agrupamento Scott Knott ($p < 0,05$).
- 8 inc = Dose de 8 Mg ha^{-1} com incorporação.

Fonte: Do autor (2021).

Os teores de Mg^{2+} na profundidade 0,20 a 0,40 m não variaram com nenhum dos tratamentos nos solos dos locais I e III, conforme já tinha sido observado para Ca^{2+} e pH, mostrando que não houve reação do calcário até esta profundidade. Para o local II, apenas a incorporação do corretivo provocou aumento nos teores de Mg^{2+} , comparado aos demais tratamentos, assim como observado para a camada de 0,10 a 0,20 m. Por outro lado, no local IV, novamente se observou aumento linear dos teores, proporcionalmente ao aumento das doses, sem incorporação. Por outro lado, os teores de Mg^{2+} observados com a incorporação da dose de 8 $Mg\ ha^{-1}$ diferiram apenas dos teores observados nas parcelas controle e naquelas que receberam 2 $Mg\ ha^{-1}$.

A lixiviação de Mg^{2+} observada principalmente no local IV, retratada pelo aumento linear dos teores, proporcionalmente ao aumento das doses, corroboram com os dados obtidos por Yagi (2018), Asami (2010) e Fidalski (2015). A alta precipitação observada neste local pode ter contribuído para a descida do Mg^{2+} para camadas inferiores, pois de acordo com Yagi (2018), altas doses de corretivo em condições com altas precipitações e com emprego de doses elevadas de N em SPD, favorece a lixiviação de Mg^{2+} para camadas subsuperficiais do solo. Em trabalho realizado por Asami (2010) altas doses de nitrogênio reduziram os valores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , até a profundidade de 0,10 m. Fidalski (2015), em aplicações de calcário sem incorporação e com avaliação até os 37 meses após a aplicação, observaram que alterações dos teores de Ca^{2+} limitaram-se à camada de 0,00 a 0,10 m, enquanto os teores de Mg^{2+} aumentaram progressivamente do primeiro ao terceiro ano até 0,6 m de profundidade.

4.1.4 Saturação por bases (V%)

Como o valor de V% é composto em sua maior parte pelo Ca^{2+} e Mg^{2+} , seu comportamento esperado seria muito semelhante ao observado para estes dois nutrientes. Na primeira amostragem, e na camada até 0,10 m, foi observado aumento linear nos valores de V% nos solos dos locais I, II e IV, em função das doses de calcário aplicadas superficialmente (FIGURA 4). Nas demais profundidades, não houve modificação dos valores de V%, devido às doses aplicadas nesta primeira avaliação.

A incorporação da maior dose (8 $Mg\ ha^{-1}$) aumentou os valores de V% na camada superficial, comparada ao controle e às doses de 2 e 4 $Mg\ ha^{-1}$ no local I, ao controle e às doses de 2 e 6 $Mg\ ha^{-1}$ local II; e a todos os tratamentos no local IV. No local III, houve ajuste de regressão quadrática, resultado inesperado já que para os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} foi observado

efeito linear. A incorporação da maior dose (8 Mg ha^{-1}) aumentou os valores de V% em relação ao controle e às doses de 2 e 4 Mg ha^{-1} .

Com relação a profundidade de 0,10 a 0,20 m, no primeiro ano não houve resposta das aplicações sem incorporação sobre os valores de V% em nenhum dos locais. Por outro lado, a incorporação da maior dose (8 Mg ha^{-1}) aumentou os valores de V%, comparado aos demais tratamentos em todas as fazendas. Com relação a camada de 0,2 a 0,4 m, os valores de V% não foram modificados por nenhum dos tratamentos após a primeira safra, em nenhum dos locais.

Acredita-se que a falta de efeito das aplicações superficiais de calcário sobre os valores de V% nas camadas superiores a 0,10 m, nesta primeira avaliação, foi devido ao pequeno tempo decorrido entre a aplicação dos corretivos e a amostragem de solo realizada. Fato semelhante foi observado por diversos autores (MOREIRA *et al.*, 2001; CAIRES, 2013; PAULETTI, 2014). Em experimento realizado por Pauletti (2014), em Latossolo sob SPD, com doses de calcário sem incorporação, foi possível perceber a alteração dos atributos químicos do solo nos primeiros 0,10 m superficiais, após três anos da aplicação, evoluindo para até 0,20 m somente seis anos após a aplicação.

Na segunda amostragem, safra 2020/2021, foi observado aumento linear dos valores de V%, com o aumento das doses aplicadas superficialmente e sem incorporação na profundidade de 0,00 a 0,10 m nos solos dos locais II, III e IV, sendo que nesta última, o efeito ocorreu em todas as profundidades. Por sua vez, no local I, foi observada uma regressão quadrática, mesmo comportamento observado para Ca^{2+} neste ano (FIGURA 2), resultado esperado, já que este nutriente é o que tem maior participação na V% do solo, validando a afirmação de que, em sistemas com altas produtividades, a necessidade de reposições é maior para evitar que haja decréscimo na fertilidade do solo. Em trabalho realizado por Gatiboni (2003), com o objetivo de avaliar os atributos químicos de um Argissolo pela aplicação superficial de calcário, foi observado o aumento da saturação com bases até os 0,40 m.

A incorporação da maior dose (8 Mg ha^{-1}) aumentou os valores de V% na camada de 0,10 a 0,20 m, comparada ao controle e às doses de 2, 4 e 6 Mg ha^{-1} no local II; e a todos os tratamentos aplicados nas fazendas III e IV. O maior contato das partículas do corretivo com os colóides do solo favorece seu efeito neutralizante. Nesta segunda amostragem, foram obtidos valores crescentes e lineares com o aumento das doses de calcário aplicadas para V% na camada de 0,10 a 0,20 m do solo no local I, resultados similares aos obtidos por Ca^{2+} e Mg^{2+} (FIGURAS 2 e 3). Pode-se dizer que houve mobilidade do calcário no solo deste local para camadas mais profundas, após 17 meses da aplicação e intensa precipitação (2.485 mm). No local II não foi observado efeito das doses aplicadas sem incorporação. Apenas a dose incorporada se

diferenciou dos demais tratamentos, resultado similar encontrado para Ca^{2+} e Mg^{2+} e pH (FIGURAS 1, 2 e 3). No local III, apesar de o tratamento incorporado ter proporcionado valor de V% 12% acima do maior valor encontrado para as aplicações sem incorporação, a diferença não foi significativa. Por sua vez, no local IV, foi validado o que já havia sido encontrado para Ca^{2+} e Mg^{2+} (FIGURAS 2 e 3), ou seja, valores de V% crescentes para as doses aplicadas, sem incorporação (FIGURA 4).

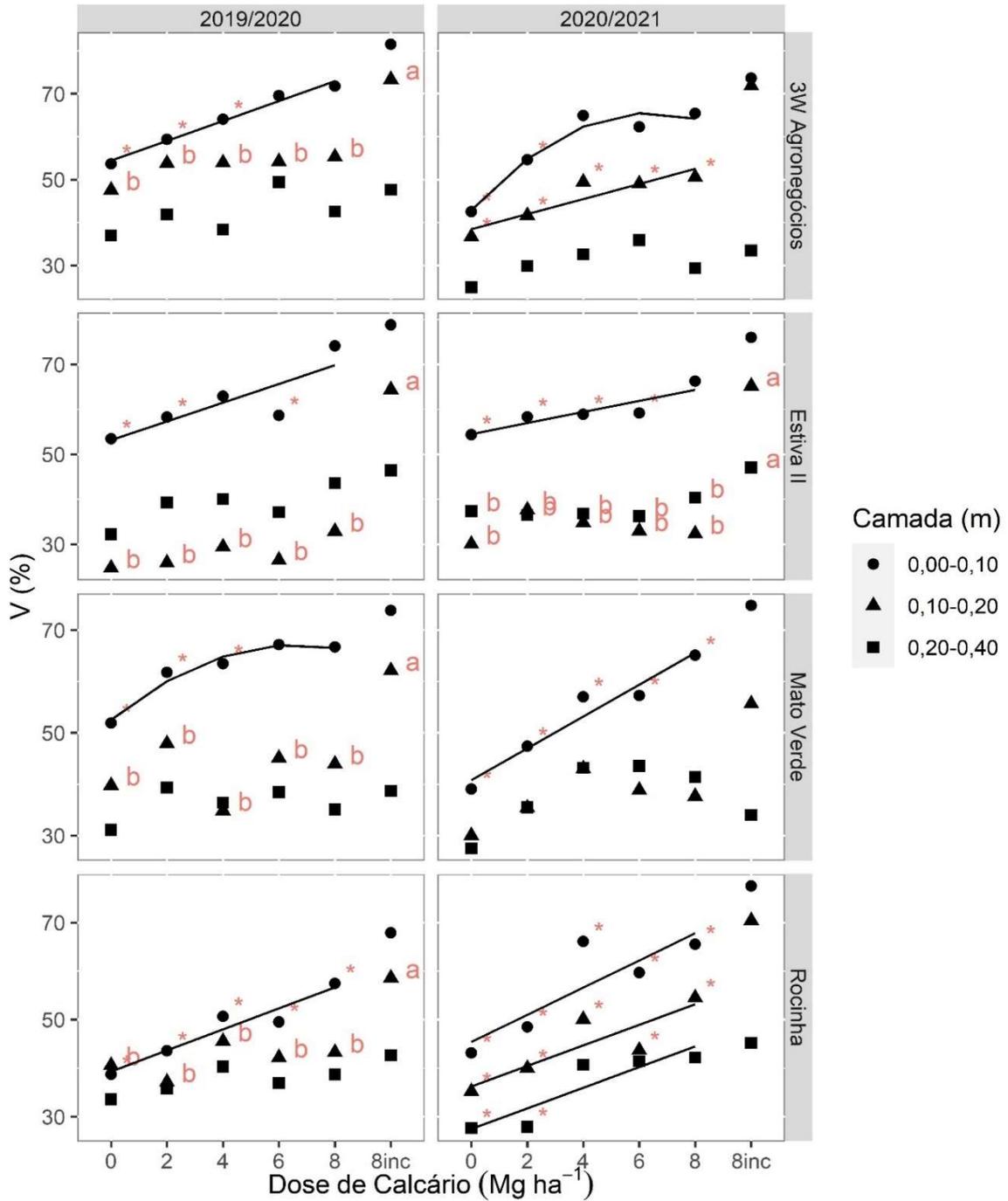
Na profundidade de 0,2 a 0,4 m, não foi observado efeito das aplicações de calcário nos valores de V% dos solos nos locais I e III, nesta segunda avaliação. Alleoni (2005), com uso da calagem em SPD sem incorporação, e após 30 meses, também não observou efeitos na camada de 0,20 a 0,40 m. Por outro lado, no local II, o tratamento incorporado se mostrou superior aos demais, não havendo regressão entre as doses sem incorporação. Por sua vez, no local IV, foi observado aumento linear dos valores de V% em função das doses aplicadas na superfície, sem efeito do tratamento com incorporação de 8 Mg ha^{-1} , em relação às demais aplicações em superfície. Para ambas as fazendas este resultado corrobora os encontrados para Ca^{2+} e Mg^{2+} e pH (FIGURAS 1, 2 e 3).

Possivelmente, os efeitos observados das doses aplicadas superficialmente, sem incorporação, até a camada de 0,20 a 0,40 m no local IV, e até a camada de 0,10 a 0,20 m, no local I, se devam às altas precipitações observadas nestes dois locais, 2.485 e 3.189 mm, respectivamente, bem como à textura mais arenosa do solo localizado no local IV (TABELA 3). Maiores efeitos da aplicação superficial de calcário, sem incorporação, são geralmente observados em solos com menor teor de argila. Em um Argissolo com 17% de argila no horizonte A, Rheinheimer (2018) observou após 18 e 24 anos efeitos mais pronunciados nas camadas mais profundas do solo, principalmente com as maiores doses aplicadas ($5,4$ e 6 Mg ha^{-1}), ao longo de três anos. Em trabalho realizado por Ciotta (2004) em Latossolo Bruno Alumínico também foi observado que aplicação de calcário sobre a superfície do solo sob SPD foi eficiente na elevação do pH e dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} na camada de 0,00 a 0,15 m, bem como na diminuição dos teores de Al^{3+} trocável na camada de 0,00 a 0,20 m. Por outro lado, no trabalho de Miranda (2005), em um Latossolo Vermelho argiloso observou-se efeitos da calagem superficial sem incorporação em SPD na correção da acidez do solo apenas na camada de 0,00 a 0,05 m, após 4 cultivos. Moreira *et al.* (2001), em Latossolo Vermelho e cultivado em SPD, observaram que a incorporação do calcário na camada de 0,20 m elevou o pH e o teor de Ca^{2+} na camada de 0,10 a 0,20 m e o teor de Mg^{2+} e V% até a camada de 0,20 a 0,30 m, semelhante ao encontrado neste trabalho. Além disso, as aplicações sem incorporação quase sempre não diferiram da mesma dose incorporada na camada de 0,00 a 0,05 m, corroborando

com resultados obtidos neste trabalho para a camada de 0,00 a 0,10 m, possivelmente pelo efeito de diluição provocado com a incorporação.

Calculando-se as necessidades de calcário para elevação da V% a 70 para as quatro áreas, com base em dados médios da camada de 0,00 a 0,20 m apresentados na Tabela 2, as doses recomendadas seriam de 1,0; 0,9; 1,5; e 0,7 Mg ha⁻¹ para os locais I, II, III e IV, respectivamente.

Figura 4 - Variação dos teores de V% em função da calagem em quatro locais ao longo de dois anos agrícolas nas profundidades de 0,00 a 0,10m, 0,10 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m.



- Doses com (*) diferem da dose de 8 Mg ha⁻¹ incorporada pelo Teste de Dunnett (p<0,05).
- Letras diferentes diferem pelo teste de agrupamento Scott Knott (p< 0,05).
- 8 inc = Dose de 8 Mg ha⁻¹ com incorporação.

Fonte: Do autor (2021).

4.1.5 Acidez Potencial (H+Al)

Observou-se, tanto na primeira, quanto na segunda amostragem, reduções lineares nos valores da acidez potencial (H+Al) na camada de 0,00 a 0,10 m nos solos dos locais I, II e IV em função das doses de calcário aplicadas superficialmente (FIGURA 5). Na primeira amostragem, para o local III, também houve diminuição dos valores de H+Al em termos absolutos, mas o modelo que melhor se ajustou foi a regressão quadrática, valores esperados, já que resultados opostos haviam sido encontrados para V% (FIGURA 5).

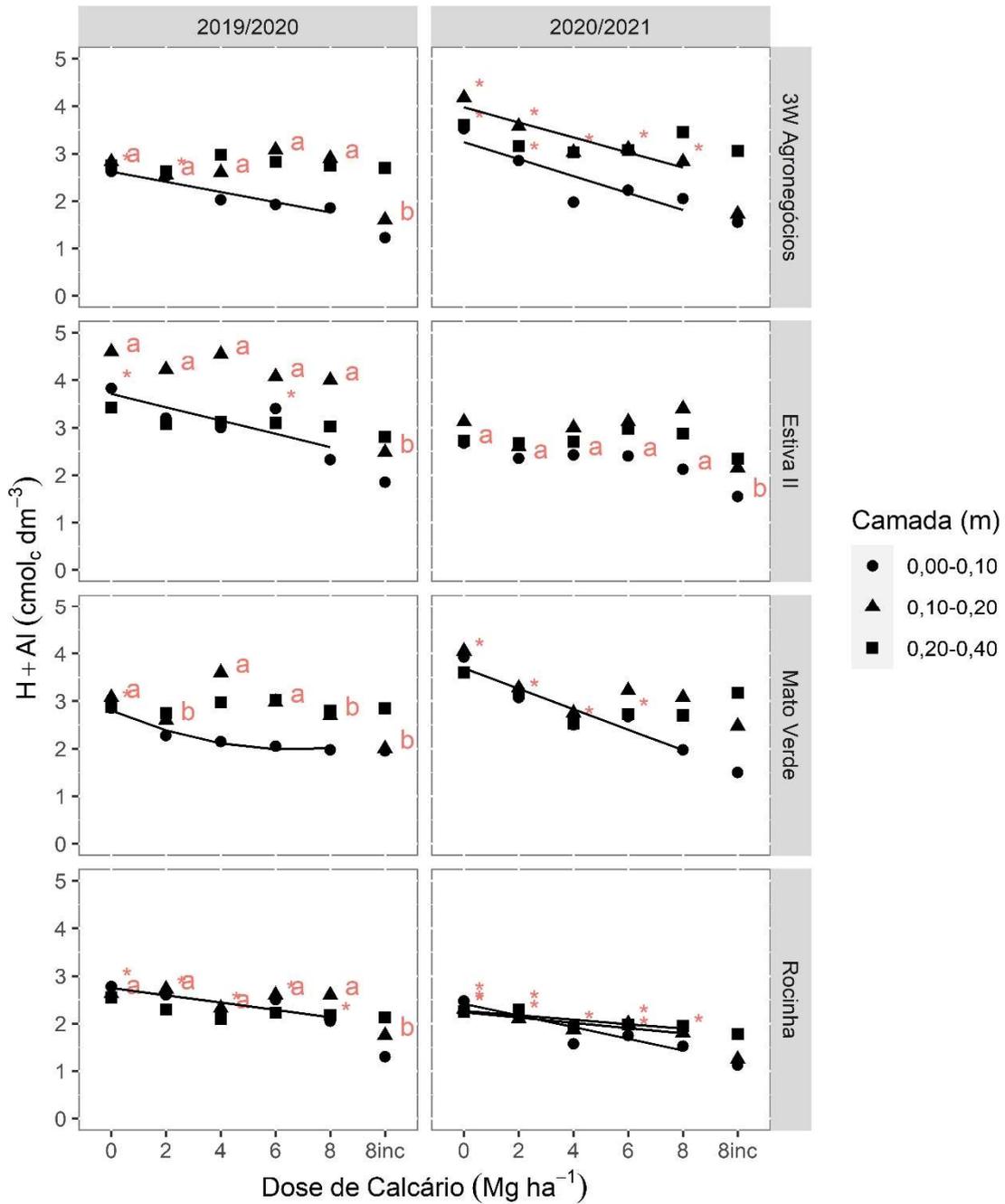
Ainda em relação à camada superficial, a incorporação da dose de 8 Mg ha⁻¹ reduziu os teores de H+Al em relação ao tratamento controle e à dose de 2 Mg ha⁻¹ no local I; em relação ao tratamento controle e à dose de 6 Mg ha⁻¹ no local II; em relação ao tratamento controle no local III e em relação a todos os tratamentos na IV.

Para a profundidade de 0,10 a 0,20 m, a incorporação da dose de 8 Mg ha⁻¹ reduziu os teores de H+Al em relação a todos os tratamentos nos solos dos locais I, II e IV. Para o local III, apenas os teores de H+Al do solo que recebeu a dose de 2 Mg ha⁻¹ não diferiu do tratamento incorporado. Na camada de 0,20 a 0,40 m, não houve efeito dos tratamentos na acidez potencial.

Na segunda amostragem após a colheita da safra 2020/2021, foi observada redução linear dos teores de H+Al da camada de 0,00 a 0,10 nos solos dos locais I, III e IV. A incorporação da dose de 8 Mg ha⁻¹ reduziu os teores de H+Al da camada superficial em relação ao controle e à dose de 2 Mg ha⁻¹ local I; em relação ao tratamento controle e às doses de 2, 4 e 6 Mg ha⁻¹ local III; e em relação ao tratamento controle às doses de 2 e 6 Mg ha⁻¹ local IV. Para o local II foi observado valores decrescentes de H+Al, porém, que não foram capazes de se ajustar no modelo de regressão.

Na profundidade de 0,20 a 0,40 m, foi observado redução linear dos teores de H+Al com a aplicação das doses de calcário na superfície para o local I e IV. Em ambos os locais, a incorporação do calcário foi mais efetiva em reduzir a acidez potencial do que qualquer uma das doses aplicadas em superfície. Por fim, apenas no local IV, a qual foi notada maior mobilidade do calcário, houve efeito linear para as doses sem incorporação na redução da acidez potencial da camada de 0,20 a 0,40 m. A dose 8 Mg ha⁻¹ incorporada também foi mais efetiva na redução da acidez do que o controle e a dose de 2 Mg ha⁻¹.

Figura 5 - Variação dos teores de H^+Al em função da calagem em quatro locais ao longo de dois anos agrícolas nas profundidades de 0,00 a 0,10m, 0,10 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m.



- Doses com (*) diferem da dose de $8\ Mg\ ha^{-1}$ incorporada pelo Teste de Dunnett ($p < 0,05$).
- Letras diferentes diferem pelo teste de agrupamento Scott Knott ($p < 0,05$).
- 8 inc = Dose de $8\ Mg\ ha^{-1}$ com incorporação.

Fonte: Do autor (2021).

4.2 Efeitos de diferentes doses de calcário sob os teores dos micronutrientes no solo

Os dados sobre os micronutrientes boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) das camadas de 0,00 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m, em cada um dos locais avaliados estão, representados na Tabela 5 para o ano de 2019/2020 e, na Tabela 6, para o ano de 2020/2021.

Na primeira amostragem, os teores de B nas profundidades de 0,00 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m do solo, avaliados no local I, apresentaram-se médios (0,36 a 0,6 mg dm⁻³), segundo Alvarez *et al.* (1999). Ressalta-se que não foram influenciados por doses crescentes de calcário aplicadas na superfície ou com a maior dose incorporada. Por sua vez, para a safra 2020/2021, os teores ficaram concentrados na faixa dita como muito baixa ($\leq 0,15$ mg dm⁻³), porém, também não diferiram com as aplicações de corretivo.

Os teores de B no solo do local III variaram entre a faixa de valores de baixo a médio, ao longo dos dois anos; por sua vez, no local IV, os valores foram classificados como muito baixos e baixos durante as duas avaliações, sem variações devidas aos tratamentos. Com relação ao local II, foi ajustada uma regressão linear positiva, ao aumento das doses de calcário, na primeira amostragem, na camada de 0,00 a 0,10 m. Porém, os valores foram pouco significativos, passando de 0,24 para 0,4 mg.dm⁻³ para o tratamento controle comparado à dose de 8 Mg ha⁻¹. Os valores situaram-se no limite teores baixos a médios, segundo Alvarez *et al.* (1999), para todos os tratamentos.

Ao contrário do observado no presente estudo, Rosolem e Biscaro (2007) observaram redução dos teores de B, em função de doses de calcário, principalmente no ano da aplicação. Segundo eles, houve adsorção de B ao precipitado Al(OH)₃, o qual é formado no solo, após a precipitação do Al³⁺ pelos íons OH⁻, advindos da reação do calcário no solo. Possivelmente, esta diferença não foi obtida para estes experimentos devido aos baixos teores de B em todas as áreas, os quais não foram capazes de se diferenciarem pelo extrator água quente. Além disso, os solos apresentavam baixos do Al³⁺, antes da calagem (TABELA 2).

Tabela 5 - Efeito da calagem nos teores de micronutrientes do solo, na safra 2019/2020 em quatro locais.

		Dose	B	Cu	Fe	Mn	Zn			Dose	B	Cu	Fe	Mn	Zn
		Mg.ha ⁻¹	-----mg.dm ⁻³ -----							Mg.ha ⁻¹	-----mg.dm ⁻³ -----				
3W Agronegócios	Estiva II	Camada de 0,0 a 0,1 m						Camada de 0,0 a 0,1 m							
		0	0,5	0,9	53,2	4,9	1,1	0	0,2	0,6	26,5	7,4b	3,1		
		2	0,3	0,9	57,0	5,6	1,4	2	0,3	0,6	32,9	7,4b	3,4		
		4	0,5	1,0	54,0	5,6	1,5	4	0,4	0,5	26,6	8,1b	3,7		
		6	0,4	0,9	52,4	5,3	1,2	6	0,3	0,6	28,3	7,8b	4,5		
		8	0,5	0,9	45,0	6,5	1,4	8	0,4	0,6	27,5	9,1a	3,7		
		8inc	0,4	0,8	47,1	6,2	1,5	8inc	0,3	0,5	27,1	10,2a	3,6		
	R ²	-	-	-	-	-	R ²	0,83	-	-	-	-			
	Efeito	NS	NS	NS	NS	NS	Efeito	y = 0,24 + 0,02x	NS	NS	SK	NS			
	Camada de 0,1 a 0,2 m						Camada de 0,1 a 0,2 m								
	0	0,5	0,8	53,4	3,6	0,9	0	0,2	0,6	25,1	3,8	2,3			
	2	0,5	0,8	48,6	4,2	1,0	2	0,3	0,6	26,5	3,8	2,5			
	4	0,6	1,0	49,3	4,0	1,2	4	0,2	0,6	27,5	3,9	2,4			
	6	0,6	0,9	50,9	4,6	1,1	6	0,2	0,6	26,0	3,7	2,3			
8	0,5	0,9	46,0	5,0	1,3	8	0,2	0,6	31,2	4,2	2,2				
8inc	0,5	0,8	47,2	4,8	1,1	8inc	0,2	0,5	21,3	4,9	2,5				
R ²	-	-	-	-	-	R ²	-	-	-	-	-				
Efeito	NS	NS	NS	NS	NS	Efeito	NS	NS	NS	NS	NS				
Dose	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Dose	B	Cu	Fe	Mn	Zn				
		Mg.ha ⁻¹	-----mg.dm ⁻³ -----							Mg.ha ⁻¹	-----mg.dm ⁻³ -----				
Mato Verde	Rocinha	Camada de 0,0 a 0,1 m						Camada de 0,0 a 0,1 m							
		0	0,3	1,0	34,1	8,5	3,5	0	0,2	0,7	37,5	22,6	2,1		
		2	0,5	0,9	31,6	10,4	2,9	2	0,2	0,7	37,7	23,6	3,1		
		4	0,5	0,9	30,0	7,9	2,7	4	0,2	0,6	36,2	20,9	1,9		
		6	0,5	1,1	31,5	9,6	3,8	6	0,2	0,6	35,2	22,3	2,1		
		8	0,4	0,9	29,6	8,3	3,4	8	0,2	0,6	34,1	25,1	2,1		
		8inc	0,5	1,4	30,4	11,3	3,4	8inc	0,2	0,5	36,0	24,3	2,0		
	R ²	-	-	-	-	-	R ²	-	-	-	-	-			
	Efeito	NS	NS	NS	NS	NS	Efeito	NS	NS	NS	NS	NS			
	Camada de 0,1 a 0,2 m						Camada de 0,1 a 0,2 m								
	0	0,3	1,0	35,5	3,6	1,3	0	0,2	0,9	54,4	12,4	0,9			
	2	0,4	1,0	37,5	5,0	1,6	2	0,2	0,9	54,3	11,4	1,2			
	4	0,3	1,0	32,9	4,3	1,3	4	0,2	0,8	56,8	11,5	0,6			
	6	0,3	1,1	35,8	4,4	1,8	6	0,2	0,9	49,7	11,4	1,5			
8	0,2	1,1	32,9	4,3	2,1	8	0,2	0,8	53,1	12,0	1,0				
8inc	0,3	1,0	33,4	4,8	1,7	8inc	0,2	0,8	55,6	13,9	0,9				
R ²	-	-	-	-	-	R ²	-	-	-	-	-				
Efeito	NS	NS	NS	NS	NS	Efeito	NS	NS	NS	NS	NS				

* -> Tratamento difere do 8inc pelo teste de Dunnett a 5%.

NS -> Não Significativo a 5% de significância

SK -> Teste de Scott Knott a 5% de significância.

Fonte: Do autor (2021).

Tabela 6 - Efeito da calagem nos teores de micronutrientes do solo, na safra 2020/2021 em quatro locais.

3W Agronegócios						Estiva II					
Dose	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Dose	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Mg.ha ⁻¹	-----mg.dm ⁻³ -----					Mg.ha ⁻¹	-----mg.dm ⁻³ -----				
Camada de 0,0 a 0,1 m						Camada de 0,0 a 0,1 m					
0	0,5	0,9	53,2	4,9	1,1	0	0,2	0,6	26,5	7,4b	3,1
2	0,3	0,9	57,0	5,6	1,4	2	0,3	0,6	32,9	7,4b	3,4
4	0,5	1,0	54,0	5,6	1,5	4	0,4	0,5	26,6	8,1b	3,7
6	0,4	0,9	52,4	5,3	1,2	6	0,3	0,6	28,3	7,8b	4,5
8	0,5	0,9	45,0	6,5	1,4	8	0,4	0,6	27,5	9,1a	3,7
8inc	0,4	0,8	47,1	6,2	1,5	8inc	0,3	0,5	27,1	10,2a	3,6
R ²	-	-	-	-	-	R ²	0,83	-	-	-	-
Efeito	NS	NS	NS	NS	NS	Efeito	$y = 0,24 + 0,02x$	NS	NS	SK	NS
Camada de 0,1 a 0,2 m						Camada de 0,1 a 0,2 m					
0	0,5	0,8	53,4	3,6	0,9	0	0,2	0,6	25,1	3,8	2,3
2	0,5	0,8	48,6	4,2	1,0	2	0,3	0,6	26,5	3,8	2,5
4	0,6	1,0	49,3	4,0	1,2	4	0,2	0,6	27,5	3,9	2,4
6	0,6	0,9	50,9	4,6	1,1	6	0,2	0,6	26,0	3,7	2,3
8	0,5	0,9	46,0	5,0	1,3	8	0,2	0,6	31,2	4,2	2,2
8inc	0,5	0,8	47,2	4,8	1,1	8inc	0,2	0,5	21,3	4,9	2,5
R ²	-	-	-	-	-	R ²	-	-	-	-	-
Efeito	NS	NS	NS	NS	NS	Efeito	NS	NS	NS	NS	NS
Dose	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Dose	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Mg.ha ⁻¹	-----mg.dm ⁻³ -----					Mg.ha ⁻¹	-----mg.dm ⁻³ -----				
Camada de 0,0 a 0,1 m						Camada de 0,0 a 0,1 m					
0	0,3	1,0	34,1	8,5	3,5	0	0,2	0,7	37,5	22,6	2,1
2	0,5	0,9	31,6	10,4	2,9	2	0,2	0,7	37,7	23,6	3,1
4	0,5	0,9	30,0	7,9	2,7	4	0,2	0,6	36,2	20,9	1,9
6	0,5	1,1	31,5	9,6	3,8	6	0,2	0,6	35,2	22,3	2,1
8	0,4	0,9	29,6	8,3	3,4	8	0,2	0,6	34,1	25,1	2,1
8inc	0,5	1,4	30,4	11,3	3,4	8inc	0,2	0,5	36,0	24,3	2,0
R ²	-	-	-	-	-	R ²	-	-	-	-	-
Efeito	NS	NS	NS	NS	NS	Efeito	NS	NS	NS	NS	NS
Camada de 0,1 a 0,2 m						Camada de 0,1 a 0,2 m					
0	0,3	1,0	35,5	3,6	1,3	0	0,2	0,9	54,4	12,4	0,9
2	0,4	1,0	37,5	5,0	1,6	2	0,2	0,9	54,3	11,4	1,2
4	0,3	1,0	32,9	4,3	1,3	4	0,2	0,8	56,8	11,5	0,6
6	0,3	1,1	35,8	4,4	1,8	6	0,2	0,9	49,7	11,4	1,5
8	0,2	1,1	32,9	4,3	2,1	8	0,2	0,8	53,1	12,0	1,0
8inc	0,3	1,0	33,4	4,8	1,7	8inc	0,2	0,8	55,6	13,9	0,9
R ²	-	-	-	-	-	R ²	-	-	-	-	-
Efeito	NS	NS	NS	NS	NS	Efeito	NS	NS	NS	NS	NS

* -> Tratamento difere do 8inc pelo teste de Dunnet a 5%.

NS -> Não Significativo a 5% de significância

SK -> Teste de Scott Knott a 5% de significância.

Fonte: Do autor (2021).

Tabela 7 - Efeito da calagem nos teores de micronutrientes do solo, na safra 2020/2021 em quatro locais.

	Dose	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Dose	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	Mg.ha ⁻¹	-----mg.dm ⁻³ -----					Mg.ha ⁻¹	-----mg.dm ⁻³ -----				
3W Agronegócios	Camada de 0,0 a 0,1 m						Camada de 0,0 a 0,1 m					
	0	0,2	1,0	61,9	6,4	1,7	0	0,4	0,7 a	29,3	6,8	3,9
	2	0,4	1,1	61,9	5,8	1,6	2	0,5	0,6 b	28,3	5,9	3,3
	4	0,3	1,1	57,8	6,7	1,8	4	0,4	0,7 a	36,3	6,6	3,6
	6	0,3	1,0	56,0	6,2	1,4	6	0,4	0,6 b	27,0	5,7	3,2
	8	0,2	1,0	52,2	6,3	1,5	8	0,5	0,6 b	27,9	6,8	4,1
	8inc	0,4	0,9	54,2	6,8	1,5	8inc	0,4	0,6 b	29,4	7,2	3,1
	R ²	-	-	0,94	-	-	R ²	-	-	-	-	-
	Efeito	NS	NS	y = 63 - 1,27x	NS	NS	Efeito	NS	SK	NS	NS	NS
	Camada de 0,1 a 0,2 m						Camada de 0,1 a 0,2 m					
	0	0,3	1,0	60,4	4,8	1,3	0	0,3	0,7	29,5	3,1	2,6
	2	0,4	0,9	59,3	4,0	1,2	2	0,3	0,6	27,3	3,0	2,8
	4	0,3	1,1	60,3	5,6	1,6	4	0,4	0,6	31,5	3,4	2,2
	6	0,5	1,0	59,2	4,9	1,2	6	0,2	0,6	30,1	2,9	2,6
8	0,3	1,0	56,4	5,2	1,5	8	0,3	0,6	29,9	3,4	2,1	
8inc	0,3	0,9	55,1	5,0	1,3	8inc	0,3	0,6	26,7	4,7	2,3	
R ²	-	-	-	-	-	R ²	-	-	-	-	-	
Efeito	NS	NS	NS	NS	NS	Efeito	NS	NS	NS	NS	NS	
Mato Verde	Camada de 0,0 a 0,1 m						Camada de 0,0 a 0,1 m					
	0	0,6	0,9	40,4	8,3	2,6	0	0,3	0,8 a	33,5*	15,7	1,7
	2	0,6	0,8	38,7	7,4	2,9	2	0,3	0,8 a	33,5*	17,4	2,7
	4	0,9	0,6	33,3	7,4	2,4	4	0,3	0,7 b	29,7	17,0	2,0
	6	0,7	0,9	39,0	8,5	2,7	6	0,3	0,8 a	30,0	16,2	1,3
	8	0,8	0,8	36,3	6,8	2,2	8	0,2	0,7 b	28,6	16,1	1,3
	8inc	1,0	1,2	38,1	10,3	2,7	8inc	0,3	0,6 b	26,2	17,5	2,0
	R ²	-	-	-	-	-	R ²	-	-	0,85	-	-
	Efeito	NS	NS	NS	NS	NS	Efeito	NS	SK	y = 33,68 - 0,66	NS	NS
	Camada de 0,1 a 0,2 m						Camada de 0,1 a 0,2 m					
	0	0,6	0,9	40,6	4,2	1,7	0	0,2	0,9	41,0	10,3	0,9
	2	0,6	0,8	40,7	2,8	1,3	2	0,2	0,9	42,5	9,8	1,1
	4	0,7	0,8	35,0	4,0	1,2	4	0,2	0,9	41,8	10,2	1,0
	6	0,4	0,8	41,1	3,2	1,3	6	0,2	0,9	39,6	10,0	0,6
8	0,6	0,8	38,7	2,9	1,1	8	0,2	0,9	42,7	10,5	0,7	
8inc	0,6	0,8	38,9	4,6	1,4	8inc	0,2	0,8	38,6	10,9	0,8	
R ²	-	-	-	-	-	R ²	-	-	-	-	-	
Efeito	NS	NS	NS	NS	NS	Efeito	NS	NS	NS	NS	NS	

* -> Tratamento difere do 8inc pelo teste de Dunnet a 5%.

NS -> Não Significativo a 5% de significância

SK -> Teste de Scott Knott a 5% de significância.

Fonte: Do autor (2021).

Os teores de Cu das duas profundidades avaliadas não foram modificados com as aplicações de calcário nos quatro locais avaliados durante o primeiro ano. Os teores variaram de valores de baixo (0,4 a 0,7 mg.dm⁻³) a médio (0,8 a 1,2 mg.dm⁻³), segundo Alvarez *et al.* (1999), em ambas as profundidades. No segundo ano, safra 2020/2021, foi observada variação nos locais II e IV, na camada de 0,00 a 0,10 m. No local II, o solo da parcela controle e daquela que recebeu a dose de 4 Mg ha⁻¹ apresentaram valores de 0,7 mg.dm⁻³, diferindo dos demais tratamentos que apresentaram valores de 0,6 mg.dm⁻³. No entanto, essa diferença de apenas 0,1 unidade, na prática tem pouca importância, não devendo ser um fator preocupante para tomada

de decisão de recomendação de calcário em superfície (MOREIRA, 2016; 2017). No local IV, os solos que receberam a dose de 8 Mg ha⁻¹, com e sem incorporação, e a dose de 4 Mg ha⁻¹ apresentaram valores inferiores, em relação aos observados nos demais locais, sendo uma diferença de 0,2 mg.dm⁻³. Nos demais locais e profundidades, as aplicações de calcário não afetou os teores de Cu no solo.

No primeiro ano não foi observada relação entre as aplicações de calcário sobre os teores deste nutriente no solo. Os teores observados se situaram nas faixas alto (>45 mg.dm⁻³) e bom (31 a 45 mg.dm⁻³), para os solos dos locais I, III e IV, segundo Alvarez *et al.* (1999). Para o local II, os valores foram médios para as duas camadas (19 a 30 mg.dm⁻³). Na segunda amostragem, safra de verão de 2020, os teores de Fe observados nos locais II e III, não foram modificados pelos tratamentos, em ambas as profundidades. Porém, os teores observados na camada de 0,00 a 0,10 m nos solos dos locais I e IV foram reduzidos com o aumento das doses de calcário. Os teores observados no local I se apresentaram na faixa de disponibilidade alta (>45 mg.dm⁻³). No local IV os teores de Fe encontrados no tratamento controle e naquele que recebeu a dose de 2 Mg ha⁻¹ ficaram na faixa de disponibilidade boa (31 a 45 mg.dm⁻³), diferindo dos teores observados no solo que recebeu a dose de 8 Mg ha⁻¹ incorporada, enquanto os demais tratamentos estiveram na faixa de disponibilidade média. Com o aumento de pH são esperadas reduções dos teores de Fe trocável, com aumento das formas oxidadas (RHOTON, 2000; CAIRES *et al.*, 2003; FONSECA *et al.*, 2010). Porém, de forma geral, os teores de Fe trocáveis foram pouco modificados pelas doses de calcário aplicadas.

Geralmente, espera-se grande redução na disponibilidade de Fe³⁺, com aplicação de doses crescentes de calcário, pois íons Fe³⁺ e Fe²⁺ tem suas atividades na solução do solo reduzidas 1000 e 100 vezes, respectivamente, para cada unidade de aumento de pH (FAGERIA *et al.*, 2002). Mas, assim como observado no presente estudo, Moreira *et al.* (2017) não observaram reduções significativas dos teores de Fe com aumento das doses de calcário.

Ao contrário do que poderia ser esperado, o aumento das doses de calcário na superfície não reduziu os teores de Mn disponíveis no solo, em nenhum dos locais, nas duas amostragens e profundidades avaliadas. Outro fato também não esperado foi o aumento dos teores de Mn da camada de 0,0 a 0,10 m do solo da Fazenda Estiva II, com a aplicação da maior dose de corretivo (8 Mg ha⁻¹), com e sem incorporação, durante a primeira amostragem.

Como a extração do Mn das amostras é feita com Mehlich I, um extrator ácido, os valores observados podem ser devido à digestão do calcário e liberação do Mn, considerando-se que o corretivo possa apresentar este nutriente. Mas, deve-se ressaltar que, esse Mn liberado durante o processo de extração, pode não corresponder ao nutriente disponível às plantas.

Conforme visto por Moreira *et al.* (2006), os teores de Mn trocáveis extraídos geralmente não representaram a quantidade disponível às plantas, devido a ineficiência dos extratores utilizados no Brasil. Além disso, esses autores observaram que pode haver associação forte do Mn trocável do solo com ligantes orgânicos das substâncias húmicas presentes no solo, reduzindo sua disponibilidade, a qual não pode ser avaliada com os extratores atuais em uso.

De forma similar ao observado para o Mn, o aumento das doses de calcário na superfície não reduziu os teores de Zn disponíveis nos solos em nenhum dos locais, nas duas profundidades nas épocas avaliadas. Foram observadas apenas diferenças nos teores de nutriente nos solos dos diferentes locais. Por exemplo, os teores de Zn observados nos locais I e IV concentraram-se na faixa de disponibilidade média (1 a 1,5 mg.dm⁻³) e alta (1,6 a 2,2 mg.dm⁻³), enquanto nas II e III, foram de altos e muito alto (>2,2 mg.dm⁻³), segundo Alvarez *et al.* (1999).

De forma geral, os resultados obtidos no presente trabalho foram muito parecidos com os observados por Tissi *et al.* (2004); Soratto (2008) e Moreira *et al.* (2017), ou seja, todos observaram poucas ou nenhuma variação nos teores de micronutrientes no solo, em função das doses de calcário na superfície, sem incorporação. Soratto (2008), por exemplo, ao longo de 18 meses, não observou nenhuma alteração nos teores de Cu, Fe, Mn e Zn, após aplicações de 1,1, 2,7 e 4,3 Mg ha⁻¹ de calcário na superfície e sem incorporação, em áreas de SPD.

Ainda sobre o teor de Zn no solo, Menezes (2010) avaliou a sensibilidade dos extratores em estudar a disponibilidade de Zn no solo, percebendo uma grande diferença entre eles, sendo o extrator DTPA, o que apresentou maior correlação entre os teores no solo e folha. Logo, neste experimento foi utilizado o Mehlich-1, portanto, possíveis alterações vistas no solo poderiam não refletir na disponibilidade e concentração foliar para as culturas. Concluindo, conforme já relatado por Moreira *et al.* (2006), Fonseca *et al.* (2010), Moreira *et al.* (2017), é possível que os extratores usados no presente estudo não tenham sido eficazes para avaliar a disponibilidade de micronutriente nos solos sob SPD.

4.3 Efeitos das diferentes doses de calcários sob a concentração foliar de nutrientes.

Os dados referentes à concentração foliar dos nutrientes cálcio (Ca), magnésio (Mg), Boro (B), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn) e Zinco (Zn) de cada uma das áreas, nas duas safras de verão dos anos 2019/2020 e 2020/2021 estão representados na Tabela 7 e Tabela 8, respectivamente.

As concentrações de Ca^{2+} nas folhas da soja, cultivada na safra 2019/2020, no local I aumentaram linearmente com o aumento de doses de calcário aplicadas, passando de 14,7 para 18,4 g kg^{-1} na dose de 8 Mg ha^{-1} , variando conforme os teores de nutriente nas camadas de 0,00 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m do solo (FIGURA 3). Entretanto, em todos os tratamentos, as concentrações de Ca^{2+} foram superiores ao valor de referência, que é 10 g kg^{-1} (TABELAS 6 e 7). Isso porque antes da instalação do experimento, o solo já apresentava teores de Ca^{2+} no solo de 2,0 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (TABELA 2), dentro da faixa de interpretação média (1,2 a 2,4 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), de acordo com Alvarez *et al.* (1999).

No local IV, os teores foliares de Ca^{2+} na soja cultivada na safra verão 2019/2020, apresentaram comportamento quadrático para as doses aplicadas, sem incorporação. Entretanto, todos os teores ficaram abaixo do valor de referência, de 10 g kg^{-1} , provavelmente devido ao baixo valor absoluto de Ca, abaixo de 2 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, encontrado no momento da instalação deste experimento. Para o tratamento com a aplicação de 8 Mg ha^{-1} , com incorporação, foi observado um valor de 9,4 g kg^{-1} , o qual diferiu do controle e da dose de 8 Mg ha^{-1} . Moreira *et al.* (2001) e Caires *et al.* (2003), em experimento com doses crescentes de calcário em SPD, observaram aumento das concentrações de Ca^{2+} e Mg^{2+} nas folhas de soja, devido ao aumento dos teores desses nutrientes no solo com as doses de calcário.

Nos teores de Ca^{2+} nas folhas de milho, cultivado na safra 2019/2020 nos locais II e III, não foi observada relação com os tratamentos. Na primeira área, os valores se concentraram acima do nível de referência (4 g kg^{-1}) enquanto na segunda, todos os valores se encaixaram dentro da faixa ideal de 2,5 a 4 g kg^{-1} (ALVAREZ *et al.*, 1999). Estas diferenças nas concentrações dos nutrientes nas folhas podem ser explicadas pelo teor do nutriente no solo, os quais variaram de 3,3 a 5,4 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para o local II, comparado, a 2,2 a 3,9 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ no local III.

Na safra 2020/2021 foi cultivado feijão no local I, cujas concentrações de Ca^{2+} nas folhas variaram de forma quadrática (TABELAS 6 e 7), da mesma forma ao que foi encontrado no solo. No entanto, todos os valores ficaram abaixo dos teores de referência para esta cultura (35 g kg^{-1}), segundo Alvarez *et al.* (1999).

No local III, também com cultivo de feijão, as concentrações de Ca^{2+} nas folhas não foram modificadas pelas doses de calcário aplicadas. Rodrighero (2015), no entanto, observou alterações nos teores foliares de Ca^{2+} nas folhas das culturas de milho e soja, com os diferentes tipos de calcários utilizados. Possivelmente, não foram observados efeitos das doses de calcário nos teores foliares de Ca^{2+} nas folhas de feijão no presente estudo devido o valor inicial na

camada de 0,00 a 0,10 m, estar acima de $2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, e para as demais camadas, apesar do valor estar bem abaixo, não foi influenciada pelos tratamentos.

Para o local II e IV, cultivadas com milho, nesta segunda safra, não houve efeito das doses de calcário aplicadas na superfície nas concentrações foliares de Ca^{2+} . Entretanto, nas doses 6 Mg ha^{-1} sem incorporação e 8 Mg ha^{-1} com incorporação, os teores de Ca^{2+} foram superiores das demais doses na área II. Porém, para todas as doses, os teores foliares foram superiores aos de referência, descritos por Alvarez *et al.* (1999).

No local IV, não houve uma resposta proporcional do aumento das doses de calcário nas concentrações de Ca^{2+} nas folhas. Pois, as concentrações de Ca^{2+} observadas nas folhas de milho, cultivadas nos locais que receberam as doses 2 e 8 Mg ha^{-1} sem incorporação e 8 Mg ha^{-1} aplicados com incorporação, foram superiores aos valores observados nos demais tratamentos. Porém, os teores encontrados nas folhas se apresentaram acima dos valores de referência. Por outro lado, em trabalho realizado por Caires (2015), foi observado elevação dos teores foliares de Ca^{2+} na cultura do milho, com o aumento das doses de calcário aplicadas em superfície.

Com relação às concentrações foliares de Mg^{2+} no ano 2019/2020, não foram observadas diferenças pelas aplicações de calcário, exceto para o local I. Apesar dos teores de Mg^{2+} no solo nas camadas de, 0,00 a 0,10 m e 0,10 m a 0,20 m nos locais II e IV e na camada de, 0,00 a 0,10 m, nos locais I e III terem sido modificados pelas doses de calcário neste primeiro ano.

No local I, as concentrações foliares de Mg^{2+} nas folhas de soja elevaram-se de forma linear com o aumento das doses de calcário em superfície, passando de $5,9$ a $6,5 \text{ g kg}^{-1}$, com todos os valores, acima do valor de referência (4 g kg^{-1}), segundo Alvarez *et al.* (1999). Para o tratamento incorporado, apenas a dose de 6 Mg ha^{-1} diferiu deste apresentando mais concentrações nas folhas do que nas plantas em que o calcário foi incorporado, mostrando pouca efetividade da incorporação no aumento foliar de Mg^{2+} .

No segundo ano, safra 2020/2021, os efeitos das doses de calcário nos teores de Mg^{2+} já foram mais pronunciados, provavelmente devido ao maior tempo decorrido entre as aplicações das doses e o cultivo das plantas. Por exemplo, no local IV, houve um aumento linear e significativo dos teores de Mg^{2+} nas folhas de milho, com elevação das doses de calcário, com maiores valores observados com o calcário incorporado, comparado com a aplicação apenas em superfície. Fato semelhante havia sido observado no solo, neste ano, para as três profundidades. Por outro lado, as concentrações de Mg^{2+} foliares nas plantas cultivadas nos locais sem incorporação ficaram abaixo do valor de referência para a cultura.

Contrariamente ao esperado, para o local III, foi observado neste segundo ano uma regressão linear negativa ao aumento de doses aplicadas sem incorporação, diferentemente do obtido pelos teores do nutriente no solo, passando de 4,1 g kg⁻¹, maior valor observado para 3,4 g kg⁻¹. No local II, não foi observada regressão, porém, o tratamento de 8 Mg ha⁻¹ com incorporação, diferiu pelo teste de Dunnett, de todos os demais tratamentos, porém, os valores ficaram abaixo do valor de referência de 4 g kg⁻¹. Para o local I, os teores de Mg²⁺ foliar da cultura do feijão não foram modificados pelos tratamentos, diferentemente do observado dos teores do nutriente no solo. Caires *et al.* (2002), afirma que a calagem na superfície em plantio direto, ao aumentar os teores de Ca²⁺ e Mg²⁺, pode proporcionar desequilíbrios nutricionais de cátions na planta de milho, principalmente entre Mg²⁺ e K. Possivelmente, pelo efeito mais expressivo do Ca²⁺ em relação ao Mg²⁺, no local I, não foi possível perceber aumento significativo no teor foliar de Mg²⁺ magnésio.

Ao contrário do esperado, as concentrações de micronutrientes nas folhas não apresentaram grandes variações com as doses de calcário aplicadas, com modificações observadas em apenas dois locais durante os dois cultivos. Na primeira safra, as concentrações de B e Cu nas folhas da soja foram modificadas pelas doses de calcário aplicadas no local I. No caso do B, houve redução linear com o aumento das doses de calcário sem incorporação, diferindo do observado no solo, em que não houve influência das aplicações nesta safra. Entretanto, todos os valores ficaram acima do nível de referência, de 20 g kg⁻¹ para a cultura da soja.

As concentrações de Cu nas folhas da soja cultivada no local I, elevaram-se linearmente com o aumento das doses de calcário sem incorporação, fato não esperado. Os teores variaram de 13,5 para 15,1 mg dm⁻³, porém, trata-se de uma pequena diferença em termos práticos, além de que, em todos os tratamentos, os valores foram superiores à referência para a cultura da soja, que é de 10 mg kg⁻¹. Esse pequeno aumento nas concentrações de Cu nas folhas de soja não era esperado, pois, quando se eleva o pH do solo, há redução na disponibilidade de Cu²⁺ (CAIRES *et al.*, 2006; MOREIRA *et al.*, 2017), além do fato que os teores de Cu encontrados no solo não terem sido afetados pelas doses de calcário (TABELA 5).

Na segunda safra, a única modificação observada com a aplicação das doses de calcário foi nos teores de Fe nas folhas do feijão cultivado no local III. Houve redução linear dos teores de ferro nas folhas de feijão, com aumento das doses de calcário. Segundo Caires *et al.* (2006), com a elevação do pH do solo, observa-se a redução da disponibilidade de Zn, Cu e Fe no solo, que é refletido nos teores foliares dos vegetais. Em trabalho realizado por Alleoni (2005), com aplicações crescentes de calcário com e sem incorporação, foi observada a redução dos teores

de Fe e Mn no solo até a camada de 0,2 m para as aplicações com incorporação e até 0,1 m, sem a incorporação, porém, em nenhum dos casos foi observado redução dos teores foliares destes nutrientes.

Com relação aos teores de Mn e Zn foliar, não foi observada nenhuma correlação com os tratamentos em todos os locais nos dois anos avaliados, fato também observado nas análises de solo, as quais não apresentaram significância em nenhuma das áreas (TABELAS 7 e 8). Em experimento realizado por Caires (2000), com aplicações superficiais de doses crescentes de calcário até 6 Mg ha⁻¹, foi observado redução da produção de grãos acumulada durante cinco safras. O autor relata que, muito provavelmente, as reduções de produtividade ocorreram devido as diminuições das absorções de Zn e Mn, em áreas com pH elevado. Desta forma, Caires (2000) passou a recomendar aplicações de calcário para o SPD apenas quando o pH CaCl₂ estivesse abaixo de 5,6 e/ou o V% menor que 65% para a camada de 0,0 a 0,05m, e a dose calculada a partir da camada de 0,0 a 0,2m para elevação do V% para 65%.

Entretanto, apesar da fundamentação de Caires (2000), atualmente as recomendações de calcário em áreas sob SPD para o estado do Paraná se baseiam na elevação da saturação por bases para exigência da cultura, por meio de amostragem de 0,00 a 0,20 m, conforme descrito no Manual de Adubação e Calagem para o estado do Paraná, podendo ser aplicada toda de uma vez. Moreira *et al.* (2017) ressaltam que nem sempre as reduções dos teores de micronutrientes são devido às aplicações superficiais de calcário, mas também devido aos teores de MO e minerais de origem do solo. Moreira *et. al.* (2016) também citam problemas dos extratores utilizados na avaliação das disponibilidades destes elementos no solo, que as vezes podem criar problemas na interpretação das reais disponibilidades às plantas. Por fim, de forma genérica, pode-se dizer que grande parte das deficiências de micronutrientes no Brasil são explicadas pelo aumento excessivo do pH na camada superficial, no entanto, alguns pesquisadores encontraram altos teores de Zn e Mn nas camadas superficiais de solos sob SPD, mesmo com elevado pH e M.O (TEIXEIRA *et al.*, 2003; MOREIRA *et al.*, 2006; MOREIRA *et al.*, 2016), assim, novas pesquisas com o tempo, devem ser continuadas.

Tabela 8 - Concentrações de nutrientes nas folhas de soja e milho em função de doses crescentes de calcário, na safra 2019/2020.

Dose	N	P	Ca	K	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Mg.ha ⁻¹	g.kg ⁻¹						mg.kg ⁻¹				
Soja - Fazenda 3W Agronegócios											
0	47,1	3,4	14,7	27,4	5,9	4,6	67,7	13,5	132,0	44,1	37,7a
2	46,1	3,6	13,9	29,6	5,5	4,4	64,1	14,0	132,3	38,5	37,6a
4	46,0	3,4	17,2	27,4	6,4	4,7	66,7	15,1	118,5	41,7	36,9a
6	46,6	3,1	19,2*	24,3	7,3*	5,2*	63,2	15,1	133,3	41,4	29,5b
8	44,8	3,1	18,4*	28,0	6,5	4,8	55,7	16,1	113,0	39,3	36,8a
8inc	48,5	3,6	15,5	28,5	6,0	4,7	62,2	15,1	146,4	37,0	31,8b
R ²	-	-	0,76	-	0,53	0,5	0,69	0,93			
Efeito	NS	NS	y = 14,1 + 0,64x	NS	y = 5,68 + 0,16	y = 4,47 + 0,06x	y = 68,4 - 1,24x	y = 13,51 + 0,31x	NS	NS	SK
Milho - Fazenda Estiva II											
0	27,3	2,5	4,3	27,0	1,8	2,0	9,4	9,4	97,2	84,0	18,1
2	26,3	2,5	4,1	25,6	1,8	1,9	8,3	8,9	89,2	90,4	18,5
4	26,1	2,4	4,1	26,2	1,8	1,9	9,4	9,1	94,9	86,1	18,2
6	24,8	2,3	3,9	25,4	1,6	1,8	8,7	8,6	86,2	75,5	17,1
8	26,0	2,5	4,3	25,8	1,8	2,0	8,9	9,0	94,2	95,5	18,5
8inc	26,6	2,5	4,2	26,8	1,9	2,0	8,6	8,9	91,1	94,5	18,6
R ²	0,52	-	-	-	-						
Efeito	y = 26,92 - 0,21x	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Soja - Fazenda Rocinha											
0	48,2	4,2	7,9*	31,5	4,0	3,7	94,3	168,2	75,4	304,1	30,2
2	49,0	4,6	8,6	31,0	4,2	3,9	93,6	140,2	89,0	277,0	33,9
4	47,8	4,2	8,8	28,1	4,1	3,8	92,4	144,5	82,5	276,9	30,2
6	48,5	4,2	9,0	29,8	4,0	3,8	99,0	185,3	76,9	330,9	29,7
8	47,7	3,9	8,3*	28,6	3,9	3,6	92,5	164,5	91,2	300,2	28,4
8inc	48,8	4,2	9,4	29,4	4,3	3,8	88,0	152,5	84,6	267,3	34,7
R ²	-	-	0,96	-	-						
Efeito	NS	NS	y = 7,8 + 0,4x - 0,05x ²	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Milho - Fazenda Mato Verde											
0	29,1	2,5	2,9	22,1	1,4	1,8	11,1	15,3	254,8	99,5	33,9
2	27,8	2,6	2,9	22,0	1,5	1,8	10,1	15,2	247,2	98,4	32,6
4	25,8	2,5	3,2	20,2	1,4	1,7	10,6	16,4	251,3	103,7	33,1
6	26,2	2,6	2,7	21,0	1,3	1,7	10,0	15,8	243,4	88,3	29,7
8	27,1	2,4	3,5	24,7	1,6	2,0	12,1	15,5	246,7	112,2	38,2
8inc	27,8	2,8	2,9	22,5	1,4	1,8	10,7	14,9	255,0	87,3	57,9
R ²	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Efeito	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Fonte: Do autor (2021).

Tabela 9 - Concentrações de nutrientes nas folhas de soja e milho em função de doses crescentes de calcário, na safra 2020/2021.

Dose	N	P	Ca	K	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Mg.ha ⁻¹	g.kg ⁻¹										
Feijão - Fazenda 3W Agronegócios											
0	39,4	3,5	20,9	25,9	6,0	4,1	39,7	289,3	254,5	231,0	49,9
2	42,8	3,5	22,2	24,8	6,5	4,5	35,8	325,0	284,9	251,5	50,3
4	38,9	3,4	23,9	28,5	5,6	4,2	37,8	285,5	260,8	232,5	52,0
6	41,3	4,0	26,2	27,1	6,7	4,9	44,0	350,9	341,0	283,6	59,4
8	40,2	3,3	18,8	26,8	5,0	4,0	36,3	307,9	262,1	253,1	50,0
8inc	41,9	3,4	23,8	27,8	6,4	4,2	35,1	300,9	277,4	237,2	50,0
R ²	-	-	0,63	-	-	-	-	-	-	-	-
Efeito	NS	NS	y = 20,02 + 2,37x - 0,29x ²	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Milho - Fazenda Estiva II											
0	34,9	3,3	4,5b	29,6	1,8b	2,2	9,5	16,0	211,0	50,9	25,8
2	34,0	3,4	5,0b	29,8	2,0b	2,3	9,7	16,2	213,9	50,9	25,2
4	34,6	3,3	4,8b	29,3	1,9b	2,2	9,6	16,2	199,9	50,7	25,2
6	36,4	3,3	5,6a	27,1	1,9b	2,3	10,6	17,1	226,4	52,5	26,5
8	34,4	3,3	4,9b	29,0	1,9b	2,3	9,6	16,0	218,2	49,4	25,3
8inc	35,4	3,7	5,8a	31,7	2,5a	2,5	10,0	17,0	206,5	47,2	23,1
R ²	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Efeito	NS	NS	SK	NS	SK	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Milho - Fazenda Rocinha											
0	32,9	4,6	7,0b	32,9	3,2*	3,3b	17,5	19,5	248,2	134,5	30,2
2	34,2	4,4	7,8a	29,3	3,3*	3,3b	16,1	16,9	227,2	109,5	26,0
4	30,4	4,3	7,3b	29,1	3,3*	3,2b	15,9	17,5	235,2	108,5	26,8
6	33,9	4,6	7,4b	30,4	3,5*	3,3b	17,1	18,0	234,0	111,1	27,3
8	33,8	4,4	8,0a	31,6	3,6*	3,4b	15,3	17,7	250,2	102,4	25,4
8inc	33,3	4,6	8,6a	29,8	4,7	3,9a	15,8	18,1	242,6	107,2	25,8
R ²	-	-	-	-	0,98	-	-	-	-	-	-
Efeito	NS	NS	SK	NS	y = 3,155 + 0,05x	SK	NS	NS	NS	NS	NS
Feijão - Fazenda Mato Verde											
0	44,2	4,0	17,0	27,2	4,1	3,6	39,2	43,7	149,2	105,0	39,6
2	42,0	4,0	16,7	26,8	4,0	3,6	39,7	43,0	142,3	101,8	37,1
4	44,7	4,2	17,2	28,4	3,6	3,3	41,2	29,2	135,9	76,5	37,1
6	43,5	4,1	15,6	29,2	3,8	3,2	40,1	36,9	130,8	75,9	37,7
8	47,0	3,9	16,1	27,8	3,4	3,2	36,5	38,9	123,4	95,2	40,6
8inc	47,9	4,4	16,9	26,6	3,9	3,5	39,3	36,2	158,6	75,8	36,8
R ²	-	-	-	-	0,75	0,84	-	-	0,99	-	-
Efeito	NS	NS	NS	NS	y = 4,06 - 0,074x	y = 3,59 - 0,056x	NS	NS	y = 148,9 - 3,15x	NS	NS

Fonte: Do autor (2021).

4.4 Efeitos das doses de calcários sob SPD nos componentes agrônômicos

Os dados de peso de mil grãos (PMG), altura e produtividade, estão representados nas Tabelas 9, 10 e 11, respectivamente. Com relação ao PMG das culturas, de modo geral, não houve efeito das doses de calcário nas duas safras, exceto o PMG do milho de segunda safra 2020/2020 e feijão de primeira safra 2020/2021, nos locais IV e I respectivamente (TABELA 9). O PMG do milho reduziu de forma linear com o aumento de doses, passando de 263 sem aplicação de calcário, para 249 g com aplicação de 8 Mg ha⁻¹ (TABELA 9). Porém, esta diferença neste componente não foi capaz de refletir em diferenças de produtividade (TABELA 11). Neste cultivo a aplicação de 8 Mg ha⁻¹ incorporada, reduziu o PMG, comparada às doses 0 e 2 Mg ha⁻¹ (TABELA 9).

Ainda em relação ao PMG, apesar de os valores de PMG do feijão terem sido crescentes, passando de 244,9 para 283,8 g na safra 2020/2021, no local I, as produtividades em função das doses apresentaram regressão quadrática (TABELA 9). O comportamento da produtividade (TABELA 11), porém, foi similar ao observado nos teores de Ca²⁺ e V% no solo (FIGURAS 2 e 4). Neste cultivo, a aplicação de 8 Mg ha⁻¹ incorporada aumentou o PMG, comparada às doses 0 e 2 Mg ha⁻¹ (TABELA 9).

No que diz respeito à altura, foi observado na safra 2019/2020, para a cultura do milho no local II, um aumento linear, proporcional ao aumento das doses aplicadas sem incorporação, e para o tratamento incorporado, este se diferiu com valores superiores de todos demais (TABELA 10). Nesta mesma safra, no local IV, foram observadas diferenças entre os tratamentos, sendo que as plantas cultivadas nas parcelas que receberam as doses de 8 Mg ha⁻¹ com incorporação, e 6 Mg ha⁻¹ sem incorporação apresentaram maior altura do que as cultivadas onde foram aplicados os outros tratamentos.

Para a safra 2020/2020, foi observado no local III, que as plantas de milho cultivadas nas parcelas que receberam a dose de 8 Mg ha⁻¹ com incorporação, apresentaram maior altura do que as cultivadas onde foram aplicados os outros tratamentos. Na safra 2020/2021, no local I, foi observado aumento linear da altura do feijão com a incorporação do calcário (TABELA 10), da mesma maneira que se viu para o aumento de produtividade (TABELA 11). Por outro lado, em nenhum outro caso, foi observado variação de produtividade devido aos tratamentos.

Tabela 10 - Peso de mil grãos (PMG) de soja, milho, e feijão, em função das diferentes doses de calcário com e sem incorporação (inc), em quatro locais.

Safra 19/20				
Dose	3W Agronegócios	Estiva II Mato Verde		Rocinha
Mg.ha⁻¹	Soja	Milho	Milheto	Soja
0	200,7	289,3	-	180,6
2	201,0	290,2	-	180,3
4	200,2	303,1	-	177,5
6	199,8	280,8	-	179,5
8	201,5	285,1	-	179,5
8inc	196,5	294,1	-	176,5
R²	-	-	-	-
Efeito	NS	NS	-	NS
Safra 20/20				
Dose	3W Agronegócios	Estiva II Mato Verde		Rocinha
Mg.ha⁻¹	Milho	Feijão	Milho	Milho
0	-	215,8	208,3	263,3
2	-	223,0	213,3	255,4
4	-	214,5	210,3	261,2
6	-	216,5	208,0	247,1
8	-	209,0	201,7	242,0
8inc	-	220,9	221,0	249,3
R²	-	-	-	-
Efeito	-	NS	NS	NS
Safra 20/21				
Dose	3W Agronegócios	Estiva II Mato Verde		Rocinha
Mg.ha⁻¹	Feijão	Milho	Feijão	Milho
0	244,9*	346,0	-	-
2	270,8*	355,3	-	-
4	279,0	351,5	-	-
6	283,5	357,5	-	-
8	283,8	349,5	-	-
8inc	283,0	350,7	-	-
R²	0,98	-	-	-
Efeito	$y = 246,42 + 12,37x - 0,98x^2$	NS	-	-

Fonte: Do autor (2021).

Tabela 11 - Altura de plantas de soja, milho e feijão, em função das diferentes doses de calcário com e sem incorporação (inc), em quatro locais.

Safra 19/20				
Dose	3W Agronegócios	Estiva II	Mato Verde	Rocinha
Mg.ha⁻¹	Soja	Milho	Milheto	Soja
0	69,7	274,7*	-	84,8b
2	70,6	276,7*	-	85,5b
4	68,2	283,7*	-	84,1b
6	72,1	280,0*	-	89,9a
8	68,4	281,1*	-	87,2b
8inc	69,5	288,9	-	90,1a
R ²	-	0,87	-	-
Efeito	NS	y = 275,33 + 0,8	-	SK
Safra 20/20				
Dose	3W Agronegócios	Estiva II	Mato Verde	Rocinha
Mg.ha⁻¹	Milho	Feijão	Milho	Milho
0	-	57,0	220,3b	251,9
2	-	61,3	227,7b	238,7
4	-	55,4	232,9b	238,8
6	-	61,6	219,7b	239,4
8	-	58,6	227,2b	238,3
8inc	-	56,4	240,0a	243,2
R ²	-	-	-	-
Efeito	-	NS	SK	NS
Safra 20/21				
Dose	3W Agronegócios	Estiva II	Mato Verde	Rocinha
Mg.ha⁻¹	Feijão	Milho	Feijão	Milho
0	43,5*	320,7	-	-
2	49,9*	316,9	-	-
4	44,9*	315,3	-	-
6	47,1*	315,7	-	-
8	46,1*	315,7	-	-
8inc	60,6	322,2	-	-
R ²	0,79	-	-	-
Efeito	y = 43,68 + 0,38	NS	-	-

Fonte: Do autor (2021).

Tabela 12 - Produtividade de soja, milho, e feijão, em função das diferentes doses de calcário com e sem incorporação, em quatro locais.

Safra 19/20				
Dose	3W Agronegócios	Estiva II	Mato Verde	Rocinha
Mg.ha⁻¹	Soja	Milho	Milheto	Soja
0	5144,5	11474,8	-	3449,3
2	5472,7	12753,2	-	3551,2
4	5369,5	12751,9	-	3416,0
6	5471,4	11163,3	-	3444,9
8	5398,8	11735,0	-	3424,2
8inc	5715,1	12177,6	-	3435,2
R²	-	-	-	-
Efeito	NS	NS	NS	NS
Safra 20/20				
Dose	3W Agronegócios	Estiva II	Mato Verde	Rocinha
Mg.ha⁻¹	Milho	Feijão	Milho	Milho
0	-	2972,4	9270,1	7499,2
2	-	2861,8	9700,8	7861,4
4	-	2753,2	9546,3	7918,0
6	-	3128,2	9411,8	7577,3
8	-	2695,6	9374,5	7581,0
8inc	-	3137,9	9913,4	7861,1
R²	-	-	-	-
Efeito	NS	NS	NS	NS
Safra 20/21				
Dose	3W Agronegócios	Estiva II	Mato Verde	Rocinha
Mg.ha⁻¹	Feijão	Milho	Feijão	Milho
0	2685,6*	15862,8	-	-
2	3088,8*	16543,7	-	-
4	3156,4	15781,1	-	-
6	3250,3	16294,3	-	-
8	3447,0	15411,8	-	-
8inc	3278,6	16903,5	-	-
R²	0,94	-	-	-
Efeito	y = 2731,8 + 83,89x	NS	NS	NS

Fonte: Do autor (2021).

Esse aumento de produtividade observado na cultura do feijão na safra 2020/21, em função incorporação de 8 Mg ha^{-1} , no local I, correspondeu a um incremento de 18%, ou seja, 593 kg ha^{-1} , em comparação ao tratamento sem calcário (TABELA 11). Em trabalho realizado por Silva (2011) também foi observado aumento de produtividade de grãos do feijoeiro em função de doses de calcário. Este incremento de produtividade pode ser explicado pelo aumento dos teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e valores de V% nas camadas 0,00 a 0,10 m, e 0,10 a 0,20 m (FIGURAS 2, 3 e 4).

Em todas as demais áreas e safras, ainda que os valores de pH, teores de nutrientes, e V% do solo tenham sido alterados nas camadas de 0,00 a 0,10 m, e em alguns casos 0,10 a 0,20 m (FIGURAS 1,2,3 e 4), as produtividades das culturas não foram afetadas (TABELA 11). Como as produtividades observadas nas fazendas podem ser consideradas elevadas (TABELA 11), quando comparadas às relatadas pela CONAB (2021), de 3528, 5663 e 1656 kg ha^{-1} de soja, milho e feijão primeira safra, respectivamente, acredita-se que os teores presentes nos solos antes das instalações dos experimentos já tenham atendido às demandas das culturas.

Como exemplo das altas produtividades obtidas, a produtividade média da cultura do milho no local II, em todos os tratamentos ficou acima dos $15.000 \text{ kg ha}^{-1}$ ou 250 scha^{-1} . Para o local I, cultivada com soja, obteve-se uma média de 5429 kg ha^{-1} , ou 90 scha^{-1} , mostrando um bom manejo e um alto potencial produtivo. Para o local IV, pode se perceber um ambiente de menor potencial produtivo, além de tratar de um solo mais arenoso, o produtor ainda tem problemas no bom estabelecimento das culturas, manejo de plantas daninhas, pragas e doenças a qual refletiu no potencial produtivo da cultura da soja, abaixo dos 3600 kg ha^{-1} ou 60 scha^{-1} .

Ressalta-se que, em vários estudos realizados com aplicação de doses de calcário em solos cultivados sob SPD, não foram obtidos aumentos de produtividade das culturas com aplicação de doses de calcário nos primeiros anos de cultivo (CAIRES, 1998; MOREIRA *et al.*, 2001; ACAIRES *et al.*, 2002; ALLEONI *et al.*, 2005; TISSI *et al.*, 2004; MELINSKI, 2015). De forma semelhante ao observado no presente estudo, Moreira *et al.* (2001) e Alleoni (2005) também não observaram aumento de produtividade para as culturas de soja e milho com incorporação de calcário em áreas que estavam sendo cultivadas sob SPD. Recentemente, Yagi (2018), avaliou o revolvimento do solo em uma área de um Latossolo muito argiloso com 17 anos de SPD, para incorporação de calcário, concluindo que o revolvimento ocasional do solo em áreas sobre SPD não traz benefícios com relação ao calcário aplicado na superfície do solo, principalmente em períodos de déficit hídrico, o que subsidia a recomendação de manter o sistema consolidado com apenas aplicações superficiais. Resultado semelhante, obtido por

Toffoli (2014) no qual não foi observado benefícios com a incorporação de calcário em áreas com SPD estabelecido.

Diferentemente dos resultados obtidos no presente estudo para soja e milho, Rodrighero *et al.* (2015) verificaram aumento de produtividade de grãos de soja e milho com a maior dose de calcário aplicada em relação ao controle. Um fator que pode ter contribuído para o não efeito das doses aplicadas no aumento de produtividade das culturas são os baixos teores Al tóxico presentes nas áreas, antes da instalação dos experimentos (TABELA 2), corroborando com os dados de Moreira *et al.* (2001). No solo estudado por Rodrighero *et al.* (2015), os teores de Al tóxicos ultrapassaram $0,7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Por fim, conforme já discutido por Rodrighero *et al.* (2015) e Nascimento (2018), acredita-se que a aplicação superficial de calcário ao longo dos anos é a forma mais adequada e sustentável do que a incorporação dos corretivos, apresentando-se como a melhor estratégia para manutenção da correção da acidez do solo cultivados sob SPD.

5 CONCLUSÃO

i. A aplicação de calcário em superfície sem incorporação foi capaz de alterar quimicamente o solo até a profundidade de 0,40 m, após 22 meses em solo de textura média.

ii. A aplicação de calcário com incorporação tem a capacidade mais rápida de alteração dos atributos químicos do solo em subsuperfície.

iii. Os micronutrientes nas camadas de 0,00 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m dos solos permanecem na mesma faixa de disponibilidade do tratamento controle, não devendo este ser uma preocupação na recomendação de doses de calcário em áreas sob SPD.

iv. As concentrações de macro e micronutrientes nas folhas de soja, milho e feijão foram pouco influenciadas pelas aplicações de calcário, ficando no mesmo nível de interpretação da aplicação controle

v. As produtividades de grãos de soja, milho e feijão de modo geral não foram afetadas pela aplicação superficial de calcário em áreas cultivadas em SPD.

REFERÊNCIAS

- AGROCONSULT. Consultorias e Projetos. 2021. **Rally da Safra - Uma viagem pelo Brasil que produz**, 2021. Disponível em: <https://rallydasafra.com.br>. Acesso em: 10 jun. 2021.
- ALCARDE, J.C. **Corretivos da acidez dos solos: características e interpretações técnicas**. São Paulo: ANDA, 1992.
- ALLEN, E.R.; HOSSNER, L.R. Factors affecting the accumulation of surface-applied agricultural limestone in permanent pastures. **Soil Science**, Madison, WI, v. 151, n. 3, p. 240–248, 1991.
- ALLEONI, L.R.F.; CAMBRI, M.A.; CAIRES, E.F. Atributos químicos de um Latossolo de Cerrado sob plantio direto, de acordo com doses e formas de aplicação de calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 29, p. 923-934, 2005.
- ALVAREZ, E. *et al.* Limestone Particle Size and Liming Scheduling Influence Soil Properties and Pasture Production. **Soil Science**, [s.l.], v. 175, n. 12, p. 601-613, 2010.
- ALVAREZ, V.V.H.; RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P.T.G. Comissão de Fertilidade do Solo do estado de Minas Gerais. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, 1999. p. 359.
- ASAMI, V.Y. **Atributos Químicos e Físicos do Solo Manejado no Sistema Plantio Direto em Função da Calagem Superficial, Manejo da Cobertura Vegetal e Adubação Nitrogenada**. 2010. 63 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2010.
- BARBOSA FILHO, M.P.; DA SILVA, O.F. Adubação e calagem para o feijoeiro irrigado em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l.], v. 35, n. 7, p. 1317-1324, 2000.
- BESEN, M. R, *et al.* Calagem: importância de seu uso planejado e continuado como base para melhoria no rendimento de grãos. **Revista Plantio Direto**, [s.l.], v. 174, p. 45-48, 2020
- BLOSS, F.D. **Crystallography and crystal chemistry: An introduction**. New York: Holt, Rinehart e Winston, 1971.
- BORTOLETI JUNIOR, A. *et al.* A importância do plantio direto e do plantio convencional e as suas relações com o manejo e conservação do solo. **Revista Conexão Eletrônica**, Três Lagoas, v. 12, n. 1, p. 1–11, 2015. MS. Disponível em: <https://silo.tips/download/a-importancia-do-plantio-direto-e-do-plantio-convencional-e-as-suas-relacoes-com#modals>. Acesso em: 09 fev. 2021.
- BOSSOLANI, J.W. *et al.* Soybean in crop rotation with maize and palisade grass intercropping enhances the long-term effects of surface liming in no-till system. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, [s.l.], v. 21, n. 1, p. 119-130, 2021.
- CAIRES, E.F. Absorção de Nutrientes pela Soja Cultivada no Sistema de Plantio Direto em função da Calagem na Superfície. **Bragantia**, [s.l.], v. 59, n. 2, p. 213-220. 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052000000200013>. Acesso em: 15 jan. 2021.

CAIRES, E. F. Correção da Acidez do Solo em Sistema Plantio Direto. **Informações Agronômicas**, [s.l.], n. 141, p. 1-13, 2013. Disponível em: [http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/4A4F64F9876B415683257B3F00708191/\\$FILE/Page1-13-141.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/4A4F64F9876B415683257B3F00708191/$FILE/Page1-13-141.pdf). Acesso em: 15 jan. 2021.

CAIRES, E.F. *et al.* Surface liming and nitrogen fertilization for crop grain production under no-till management in Brazil. **European Journal of Agronomy**, Conthey, v. 66, p. 41-53, 2015.

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**, [s.l.], v. 27, n. 2, p. 275-286, 2003.

CAIRES, E.F.; JORIS, H.A.W. Uso de corretivos granulados na agricultura. **IPNI-International Plant Nutrition Institute**, Piracicaba-SP, n. 154, p. 17-21, 2016.

CAIRES, E. *Fet al.* Calagem superficial e cobertura de aveia preta antecedendo os cultivos de milho e soja em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 1, p. 87-98, 2006.

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

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**, [s.l.], v. 28, n. 1, p. 57-64, 2008.

CAIRES, E.F. Calagem na Superfície em Sistema Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 24, n. 1, p. 161-69, 2000.

CAMBRI, M.A. **Calagem e formas de alumínio em três localidades sob sistema de plantio direto**. 2004. 95 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

CALEGARI A. *et al.* Long-term effect of different soil management systems and winter crops on soil acidity and vertical distribution of nutrients in a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, [s.l.], v. 133, n. p. 32-9, 2013.

CARDINALE, B.J. *et al.* **Biodiversity Loss and Its Impact on Humanity**. Nature.Com. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature11148/boxes/bx2>. 2012. Acesso em: 28 jun. 2021.

CHAPLA, M.E. **Calagem superficial em área de plantio direto**. Universidade Federal de Mato Grosso. 2017. Tese (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Mato Grosso, 2017.

CIOTTA, M.N. *et al.* Manejo da Calagem e os Componentes da Acidez de Latossolo Bruno em Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 28, n. 2, p. 317-26, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-06832004000200010>. Acesso em: 15 jun. 2021

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, DF, v. 8, safra 2020/21, n. 10 décimo levantamento, julho. 2021.

CONYERS, M.K. *et al.* Amelioration of acidity with time by limestone under contrasting tillage. **Soil and Tillage Research**, [s.l.], v. 72, p. 85-94, 2003.

DA COSTA, C.H.M; CRUSCIOL, C.A.C. Long-term effects of lime and phosphor gypsum application on tropical no-till soybean–oat–sorghum rotation and soil chemical properties. **European journal of agronomy**, [s.l.], v. 74, p. 119-132, 2016.

DOS SANTOS, D.R.*et al.* 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 and Tillage Research**, [s.l.], v. 180, p. 222-231, 2018.

ERNANI, P.R.; RIBEIRO, M.F.; BAYER, C. Modificações químicas causadas pela calagem abaixo da camada calada em um solo ácido de carga predominantemente variável. **Comunicações em Ciência do Solo e Análise de Plantas**, [s.l.], v. 35, p. 5-6, p. 889-901, 2004.

FAGERIA, N.K. Efeito da calagem na produção de arroz, feijão, milho e soja em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** [online], v. 36, n. 11, pp. 1419-1424, 20 dez. 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2001001100013>. ISSN 1678-3921. Acesso em: 18 jun. 2021.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **How to Feed the World in 2050**. Outlook for Food Security towards 2050. Proceedings of The Fsn Forum Discussion n. 43. How to Feed The World In 2050? 16 september to 19 october2009. Disponível em: http://assets.fsnforum.fao.org.s3-eu-west.amazonaws.com/public/files/43_Feed_World_2050/PROCEEDINGS%20How%20to%20Feed%20the%20World%20in%202050.pdf. Acesso em: 09 fev. 2021.

FEBRAPDP. Federação Brasileira de Plantio Direto. **Área sob Plantio Direto**. Cati-SP. Disponível em: <https://febrapdp.org.br/area-de-pd>. Acesso em: 05 fev. 2021.

FIDALSKI, J.; YAGI, R.; TORMENA, C.A. Revolvimento ocasional e calagem em latossolo muito argiloso em sistema plantio direto consolidado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 39, n. 5, p. 1483-1489, 2015.

FRÓNA, D.; SZENDERÁK, J.; HARANGI-RÁKOS, M. The Challenge of Feeding the World. **Sustainability** [s.l.], v. 11, n. 2, p. 5816, 2019.

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**, [s.l.], v. 67, p. 60-70, 2010.

GATIBONI, L.C. *et al.* Alterações nos atributos químicos de solo arenoso pela calagem superficial no sistema plantio direto consolidado. **Ciência Rural**, [s.l.], v. 33, p. 283-290, 2003.

HALISKI, A. **Atributos Químicos do Solo e Produtividade da Soja Influenciados pela Calagem Superficial e Adubação Nitrogenada no Sistema Plantio Direto**. 2015. 61 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura). Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2015. Disponível em: <https://tede2.uepg.br/jspui/handle/prefix/2259>. Acesso em: 15 jun. 2021.

HAVLIN, J.L. *et al.* **Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management**, 8th ed. Pearson. 2013. 2016.

JORIS, H. A. W. *et al.* Liming in the conversion from degraded pastureland to a no-till cropping system in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, [s.l.], v. 162, p. 68-77, 2016.

KAMINSKI, J. *et al.* Estimativa da acidez potencial em solos e sua implicação no cálculo da necessidade de calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 26, n. 4, 2002.

LEITE, O.C. Influência de Dosagens de Calcário em um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico no sul do Tocantins. **Enciclopedia Biosfera**, [s.l.], v. 15, n. 28, p. 530-543, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.18677/EnciBio>. 2018. Acesso em: 30 jun. 201.

LEPSCH, I.F. **Formação e conservação dos solos**. 2. ed. Oficina de textos, 2016.

LOPES, A.S.; SILVA, M. de C.; GUILHERME, L.R.G. 1991. **Boletim Técnico N° 1 Acidez do Solo e Calagem**. Disponível em: http://www.ifbaiano.edu.br/unidades/valenca/files/2011/05/acidez_do_solo_e_calagem.pdf. Acesso em: 30 jun. 2021.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fósforo, 1997. p. 319.

MALAVOLTA, E. **Nutrição mineral e adubação do cafeeiro**. São Paulo: Ceres, 1981.

MELINSKI, A.M. **Produtividade de soja e milho em função das práticas de rotação e calagem superficial em plantio direto**. 2020. 71 f. Dissertação (Pós-Graduação em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

MENEZES, A.A. *et al.* Disponibilidade de zinco para milho pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3 e DPTA em solos de Minas Gerais, na presença e ausência de calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 34, p. 417-424, 2010.

MERTEN, G.M. *et al.* Potencial acidificante de diferentes fertilizantes fosfatados aplicados em dois solos do Paraná. **Revista Cultivando o Saber**, [s.l.], v. 12, n. 3, p. 32-42, julho a setembro de 2019.

MILLER, L. How fast is lime moving and is it treating acidity at depth? **Southern Farming Systems**, p. 133-135, 2015.

MIRANDA, L.N. de *et al.* Utilização de calcário em plantio direto e convencional de soja e milho em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l.], v. 40, p. 563-572, 2005.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; FRANCHINI, J.C. Evaluation of plant residues on the mobility of surface applied lime. *Braz. Arch. Biol. Technol.*, [s.l.], v. 45, p. 251-256, 2002.

MORAES, F.A. de. **Doses de calcário na construção da fertilidade do perfil do solo**. 2019. 66 f. Dissertação (Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2019.

MOREIRA, S.G. *et al.* Calagem em Sistema de Semeadura Direta e Efeitos sobre a Acidez do Solo, disponibilidade de Nutrientes e Produtividade de Milho e Soja. Fertilidade do solo e nutrição de plantas. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, [s.l.], v. 25, p. 1, mar. 2001.

MOREIRA, S.G. *et al.* Effect of liming on micronutrient availability to soybean grown in soil under different lengths of time under no tillage. *Acta Scientiarum-Agronomy*, [s.l.], v. 39, p. 89, 2017.

MOREIRA, S.G.; MORAES, F.A. Construção da Fertilidade do Solo para o Sistema de Produção de Culturas Anuais. *In: PAES, M.C.D.; VON PINHO, R.G.; MOREIRA, S.G. (Org.). Soluções integradas para os sistemas de produção de milho e sorgo no Brasil. CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 2018, 4., Sete Lagoas. Anais [...]. Sete Lagoas, 2018. p. 347-383.*

MOREIRA, S.G. Desafios para a sustentabilidade dos sistemas de produção com culturas anuais. *Informações Agronômicas NPCT*, [s.l.], v. dez/19, p. 16-26, 2019.

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*, [s.l.], v. 163, p. 41-53, 2016.

MOREIRA, S.G. *et al.* Formas químicas, disponibilidade de manganês e produtividade de soja em solos sob semeadura direta. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, [s.l.], v. 30, p. 121-136, 2006.

MUZILLI, O. Manejo da fertilidade do solo. **Plantio direto no Estado do Paraná**, v. 23, 1981.

NASCIMENTO, R. **Calagem e gessagem com e sem incorporação em latossolo vermelho sob plantio direto**. 2018. Tese (Programa de Pós-Graduação em Agronomia) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR, 2018.

NEPAR. Núcleo Estadual do Paraná. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. Curitiba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2018. 289 p.

NOVAIS, R.F. *et al.* **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

OLIVEIRA, E.L. de; PAVAN, M.A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. *Soil and Tillage Research*, [s.l.], v. 38, p. 47-57, 1996.

PAULETTI, V. Equilíbrio entre bases do solo e produtividade das culturas. **Informações Agronômicas NPCT**, [s.l.], v. set/20, p. 1-12, 2020.

PAULETTI, V. *et al.* Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 38, p. 495-505, 2014.

PAVINATO, P.S. *et al.* **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná**. Paraná: Universidade Federal do Paraná, 2017.

PEIXOTO, D.S. *et al.* Occasional tillage in no-tillage systems: A global meta-analysis. **Science of the Total Environment**, [s.l.], v. 745, p. 140887, 2020.

PENN, C.J.; CAMBERATO, J.J. A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. **Agriculture**, [s.l.], v. 9, n. 6, p. 120, 2019.

PETRERE, C.; ANGHINONI, I. Alteração de atributos químicos no perfil do solo pela calagem superficial em campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 25, p. 885-895, 2001.

POTTKER, D.; BEN, J.R. Calagem para uma rotação de culturas no sistema de plantio direto. **R. Bras. Ciência do Solo**, [s.l.], v. 22, p. 675-684, 1998.

PROCHNOW, L.I. Avaliação e Manejo da Acidez do Solo. **Informações Agronômicas**, [s.l.], v. 146, n. 1, p. 5-9, 2004.

QUAGGIO, J.A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2000. p.111.

RAIJ, B.V. **Melhorando o ambiente radicular em subsuperfície**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. p 8-18.

RAIJ, B.V. *et al* **Recomendações de calagem e adubação para o estado de São Paulo**. Campinas: IAC & Fundação IAC, 1997. p. 285.

RAMPIM, L. *et al.* Atributos Químicos de Solo e Resposta do Trigo e da Soja ao Gesso em Sistema Semeadura Direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 35, n. 1, p. 1687-1698, 2011.

RESENDE, A.V. *et al.* Solos de Fertilidade Construída: Características, Funcionamento e Manejo. **Informações Agronômicas**, [s.l.], v. 156, 2016.

RESENDE, A. V. **O sistema plantio direto proporciona maior eficiência no uso de fertilizantes**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2011. Documentos (INFOTECA-E), 2011.

RHEINHEIMER, D.S. *et al.* Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 4, p. 797-805, 2000.

- RHEINHEIMER, D.S. *et al.* Residual effect of surface-applied lime on soil acidity properties in a long-term experiment under no-till in a Southern Brazilian sandy Ultisol. **Geoderma**, [s.l.], v. 313, p. 7-16, 2018.
- RHOTON, F.E. Influence of time on soil response to no-till practices. **Soil Science Society of America Journal**, [s.l.], v. 64, p. 700-709, 2000.
- ROCHETTE, P. *et al.* NH₃ volatilization, soil concentration and soil pH following subsurface banding of urea at increasing rates. **Canadian Journal of Soil Science**, [s.l.], v. 93, n. 2, p. 261-268, 2013.
- RODRIGHERO, M.B.; BARTH, G.; CAIRES, E.F. Aplicação superficial de calcário com diferentes teores de magnésio e granulometrias em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 1723–1736, 2015.
- ROSOLEM, C.A.; BÍSCARO, T. Adsorção e lixiviação de boro em Latossolo Vermelho-Amarelo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l.], v. 42, p. 1473-1478, 2007.
- ROSOLEM, C.A.; FOLONI, J.S.S.; OLIVEIRA, R.H. de. Dinâmica do nitrogênio no solo em razão da calagem e adubação nitrogenada, com palha na superfície. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l.], v. 38, n. 2, p. 301-309, 2003.
- SÁ, J.C.M. **Calagem em solos sob plantio direto da Região dos Campos Gerais**, Centro Sul do Paraná. In: SÁ, J.C.M. (Coord.). Curso sobre o manejo do solo no sistema de plantio direto. Castro: Fundação ABC, 1995. p. 73-107.
- SALOMONS, W.; MOOK, W.G. Isotope geochemistry of carbonate dissolution and reprecipitation in soils. **Soil Science**, [s.l.], v. 122, p. 15-24, 1976.
- SAUERESSIG, D. Sistema Plantio Direto: Os Pilares do Equilíbrio. **Revista A Granja**, 845. ed. Disponível em: <https://edcentaurus.com.br/agranja/edicao/845/materia/9911>. 2019. Acesso em: 09 fev. 2021.
- SBCS. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Comissão de Química e Fertilidade do Solo. **Manual de Adubação e de Calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre, 2004. 400 p. Disponível em: http://www.sbc-nrs.org.br/docs/manual_de_adubacao_2004_versao_internet.pdf. Acesso em: 30 jun. 2021.
- SHOEMAKER, H.E.; MCLEAN, E.O.; PRATT, P.F. Buffer methods for determining lime requirement of soils with appreciable amounts of extractable aluminum. **Soil Science Society of American Journal**, [s.l.], n. 25, p. 274-276, 1961.
- SILVA, F.C. da (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009.
- SILVA, T.R.B. da. *et al.* Produtividade e características tecnológicas de cultivares de feijão em resposta à calagem superficial em plantio direto. **Bragantia**, [s.l.], v. 70, n. 1, p. 196-205, 2011.

SOUSA, D.M.G de.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004.

SOUSA, D.M.G.; MIRANDA, L.N.; OLIVEIRA, S.A. Acidez do solo e sua correção. *In*: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. Cap. 5. p. 205-274.

SCHONINGER, E.L. *et al.* Atributos químicos do solo e produtividade da cultura de soja em área de semeadura direta após calagem superficial. **Semina: Ciências Agrárias**, [s.l.], v. 31, n. 1, p. 1253-1262, 2010.

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 Ciência do Solo**, [s.l.], v. 32, p. 675-688, 2008.

SORATTO, R.P.; FERNANDES, A.M. L.A. de.; SANTOS, A.L.G.J. "Nutrient extraction and exportation by common bean cultivars under different fertilization levels: I macronutrients." **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 37, n. 4, p. 1027-1042, 2013.

TANG, C. *et al.* Respostas do trigo e da cevada à 70 calagem em solo arenoso com acidez do subsolo. **Field Crops Research**, [s.l.], v. 80, n. 3, p. 235-244, 2003.

TEIXEIRA, I.R. *et al.* F. Variação dos valores de pH e dos teores de carbono orgânico, cobre, manganês, zinco e ferro em profundidade em argissolo vermelho-amarelo, sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Bragantia**, [s.l.], v. 62, n. 1, p. 119-126, 2003.

TISSI, J.A; CAIRES, E.F.; PAULETTI, V. Efeitos da calagem em semedura direta de milho. **Bragantia**, [s.l.], v. 63, p. 405-413, 2004.

TOFFOLLI, L.C.B. *et al.* Application limestone forms and doses for Alfalfa in no-tillage system. **Revista Ciência Agronômica**, [s.l.], v. 45, p. 906-913, 2014.

TOMÉ JR., J.B. **Manual para interpretação de análise de solo**. Guaíba: Livraria e Editora Agropecuária, 1997. p. 247.

TRUOG, E. Acidic soils. **Soils in our environment**. Upper Saddle River (NJ): Pearson Prentice Hall, p. 239-277 2004.

UFLA. Universidade Federal de Lavras. Biblioteca Universitária. **Manual de normalização e estrutura de trabalhos acadêmicos: TCCs, monografias, dissertações e teses**. 3. ed. rev. atual. e ampl. Lavras, 2020. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/11017>. Acesso em: 20 abr. 2021.

VITTI, G.C.; PRIORI, J.C. Calcário e gesso: os corretivos essenciais ao plantio direto. **Revista Visão Agrícola**, [s.l.], n. 9, p. 30-34, 2009.

WIETHÖLTER, S. **Manual de Adubação e de Calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC. 10. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004.

YAGI, R. Occasional soil tillage, liming, and nitrogen fertilization on long-term no-tillage system. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, [s.l.], v. 53, p. 833-839, 2018.

YE, G. *et al.* Long-term application of manure over plant residues mitigates acidification, builds soil organic carbon and shifts prokaryotic diversity in acidic Ultisols. **Applied Soil Ecology**, [s.l.], v. 133, p. 24-33, 2019.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Modelos estatísticos

Tabela 12 – Modelo estatístico dos valores de pH CaCl₂ ao longo das duas safras, para quatro locais.

Fazenda	Ano	Profundidade (cm)	Modelo	R ²	AIC Linear	AIC Quadrático	valor p	Dose ótima (Mg)	Y*
pH (CaCl₂)									
3W Agronegócios	19/20	0-10	$\hat{y} = 5,2 + 0,14x$	0,95	1,4	1,4	< 1%	8	6,3
		10-20							
		20-40							
	20/21	0-10	$\hat{y} = 5,16 + 0,1x$	0,69	20,8	19,9	< 1%	8	6,0
		10-20							
		20-40							
Estiva II	19/20	0-10	$\hat{y} = 5,09 + 0,1x$	0,80	26,5	28,2	< 5%	8	5,9
		10-20							
		20-40							
	20/21	0-10	$\hat{y} = 5,2 + 0,05x$	0,65	8,7	9,8	< 1%	8	5,6
		10-20							
		20-40							
Mato Verde	19/20	0-10	$\hat{y} = 5,24 + 0,09x$	0,83	3,2	3,4	< 1%	8	5,9
		10-20							
		20-40							
	20/21	0-10	$\hat{y} = 4,85 + 0,09x$	0,87	20,0	20,4	< 1%	8	5,6
		10-20							
		20-40							
Rocinha	19/20	0-10	$\hat{y} = 4,95 + 0,07x$	0,57	18,9	20,9	< 5%	8	5,5
		10-20							
		20-40							
	20/21	0-10	$\hat{y} = 4,755 + 0,13x$	0,76	17,4	16,4	< 1%	8	5,8
		10-20	$\hat{y} = 4,76 + 0,07x$	0,78	6,7	8,5	< 1%	8	5,3
		20-40	$\hat{y} = 4,48 + 0,03x$	0,47	-8,9	-9,1	< 5%	8	4,7

Fonte: Do autor (2021).

Tabela 13 – Modelo estatístico dos valores de Ca^{2+} ao longo das duas safras, para quatro locais.

Fazenda	Ano	Profundidade (cm)	Modelo	R ²	AIC Linear	AIC Quadrático	valor p	Dose ótima (Mg)	Y*
Ca^{2+} (cmol _c dm ⁻³)									
3W Agronegócios	19/20	0-10	$\hat{y} = 2,1 + 0,14x$	0,94	25,4	27,4	< 1%	8	3,1
		10-20	$\hat{y} = 1,75 + 0,1x$	0,79	37,0	38,3	< 5%	8	2,5
		20-40							
	20/21	0-10	$\hat{y} = 1,7 + 0,24x - 0,02x^2$	0,89	4,5	1,1	< 5%	6	2,4
		10-20	$\hat{y} = 1,73 + 0,05x$	0,70	5,2	5,6	< 5%	8	2,1
		20-40							
Estiva II	19/20	0-10	$\hat{y} = 3,1 + 0,17x$	0,64	45,3	44,0	< 1%	8	4,4
		10-20							
		20-40							
	20/21	0-10	$\hat{y} = 2,3 + 0,07x$	0,80	1,4	-0,1	< 1%	8	2,8
		10-20							
		20-40							
Mato Verde	19/20	0-10	$\hat{y} = 2,3 + 0,07x$	0,64	17,2	15,7	< 5%	8	2,9
		10-20							
		20-40							
	20/21	0-10	$\hat{y} = 1,8 + 0,11x$	0,92	11,6	12,7	< 1%	8	2,6
		10-20							
		20-40							
Rocinha	19/20	0-10	$\hat{y} = 1,3 + 0,1x$	0,98	-10,2	-8,2	< 1%	8	2,0
		10-20							
		20-40							
	20/21	0-10	$\hat{y} = 1,49 + 0,08x$	0,58	13,9	12,8	< 1%	8	2,2
		10-20	$\hat{y} = 0,9 + 0,07x$	0,69	5,9	7,9	< 1%	8	1,4
		20-40	$\hat{y} = 0,63 + 0,05x$	0,75	-3,0	-2,1	< 1%	8	1,1

Fonte: Do autor (2021).

Tabela 14 – Modelo estatístico dos valores de Mg^{2+} ao longo das duas safras, para quatro locais.

Fazenda	Ano	Profundidade (cm)	Modelo	R ²	AIC Linear	AIC Quadrático	valor p	Dose ótima (Mg)	Y*
Mg²⁺ (cmol_c dm⁻³)									
3W Agronegócios	19/20	0-10	$\hat{y} = 0,71 + 0,06x$	0,93	-12,9	-11,2	< 1%	8	1,2
		10-20							
		20-40							
	20/21	0-10	$\hat{y} = 0,57 + 0,05x$	0,84	-22	-22,6	< 1%	8	0,9
		10-20	$\hat{y} = 0,43 + 0,02x$	0,78	-42,1	-43	< 1%	8	0,6
		20-40							
Estiva II	19/20	0-10	$\hat{y} = 0,87 + 0,08x$	0,69	10	7,8	< 1%	8	1,5
		10-20	$\hat{y} = 0,27 + 0,02x$	0,63	-35,64	-34,03	< 5%	8	0,4
		20-40							
	20/21	0-10	$\hat{y} = 0,63 + 0,04x$	0,86	-16,1	-14,3	< 1%	8	0,9
		10-20							
		20-40							
Mato Verde	19/20	0-10	$\hat{y} = 0,62 + 0,04x$	0,97	-23,2	-21,7	< 1%	8	0,9
		10-20							
		20-40							
	20/21	0-10	$\hat{y} = 0,53 + 0,04x$	0,96	-30,8	-29	< 1%	8	0,9
		10-20							
		20-40							
Rocinha	19/20	0-10	$\hat{y} = 0,39 + 0,02x$	0,93	-30,3	-28,3	< 5%	8	0,6
		10-20	$\hat{y} = 0,34 + 0,03x$	0,75	-35,7	-34,1	< 1%	8	0,5
		20-40							
	20/21	0-10	$\hat{y} = 0,38 + 0,04x$	0,67	-23,8	-26,2	< 1%	8	0,7
		10-20	$\hat{y} = 0,23 + 0,04x$	0,79	-26,9	-24,9	< 1%	8	0,5
		20-40	$\hat{y} = 0,13 + 0,03x$	0,98	-43,1	-41,2	< 1%	8	0,4

Fonte: Do autor (2021).

Tabela 15 – Modelo estatístico dos valores de V% ao longo das duas safras, para quatro locais.

Fazenda	Ano	Profundidade (cm)	Modelo	R ²	AIC Linear	AIC Quadrático	valor p	Dose ótima (Mg)	Y*
V %									
3W Agronegócios	19/20	0-10	$\hat{y} = 54,4 + 2,32x$	0,98	138,1	139,9	<1%	8	73,0
		10-20							
		20-40							
	20/21	0-10	$= 42,86 + 7,07x - 0,55$	0,95	146,4	143,8	<5%	6,4	65,6
		10-20	$\hat{y} = 38,4 + 1,76x$	0,85	122,3	120,7	<1%	8	52,5
		20-40							
Estiva II	19/20	0-10	$\hat{y} = 53,1 + 2,09x$	0,71	146,6	147,9	<1%	8	69,8
		10-20							
		20-40							
	20/21	0-10	$\hat{y} = 54,5 + 1,23x$	0,82	126,5	128,0	<1%	8	64,3
		10-20							
		20-40							
Mato Verde	19/20	0-10	$= 52,54 + 4,41x - 0,33$	0,96	122,0	118,1	<5%	6,7	67,3
		10-20							
		20-40							
	20/21	0-10	$\hat{y} = 40,8 + 3,1x$	0,94	125,3	125,9	<1%	8	65,5
		10-20							
		20-40							
Rocinha	19/20	0-10	$\hat{y} = 39,3 + 2,17x$	0,92	133,2	135,2	<1%	8	56,7
		10-20							
		20-40							
	20/21	0-10	$\hat{y} = 45,4 + 2,8x$	0,73	140,7	139,4	<1%	8	67,8
		10-20	$\hat{y} = 36,2 + 2,12x$	0,75	136,6	138,4	<1%	8	53,1
		20-40	$\hat{y} = 27,5 + 2,1x$	0,81	137,4	138,6	<1%	8	44,5

Fonte: Do autor (2021).

Tabela 16 – Modelo estatístico dos valores de H+Al ao longo das duas safras, para quatro locais.

Fazenda	Ano	Profundidade (cm)	Modelo	R ²	AIC Linear	AIC Quadrático	valor p	Dose ótima (Mg)	Y*
H+Al (cmol_c dm⁻³)									
3W Agronegócios	19/20	0-10	$\hat{y} = 2,62 - 0,11x$	0,90	41,03	42,86	<5%	8	1,8
		10-20							
		20-40							
	20/21	0-10	$\hat{y} = 3,2 - 0,18x$	0,74	44,99	43,57	<1%	8	1,8
		10-20	$\hat{y} = 4 - 0,16x$	0,86	19,80	17,37	<1%	8	2,7
		20-40							
Estiva II	19/20	0-10							
		10-20							
		20-40							
	20/21	0-10							
		10-20							
		20-40							
Mato Verde	19/20	0-10	$\hat{y} = 2,8 - 0,25x - 0,02x^2$	0,96	6,62	2,90	<5%	6,8	2,0
		10-20							
		20-40							
	20/21	0-10	$\hat{y} = 3,7 - 0,22x$	0,87	26,51	26,48	<1%	8	2,0
		10-20							
		20-40							
Rocinha	19/20	0-10	$\hat{y} = 2,8 - 0,78x$	0,75	26,27	28,27	<5%	8	-3,5
		10-20							
		20-40							
	20/21	0-10	$\hat{y} = 2,4 - 0,12x$	0,79	15,22	15,14	<1%	8	1,4
		10-20	$\hat{y} = 2,2 - 0,06x$	0,78	-3,1387	-2,1057	<1%	8	1,8
		20-40	$\hat{y} = 2,3 - 0,05x$	0,66	-5,78	-4,4568	<1%	8	1,9