

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA - UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS - CAV
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DOUTORADO EM CIÊNCIA DO SOLO**

JÉSSICA DIANDRA STRINGARI

**EFETIVIDADE DA CORREÇÃO DE ACIDEZ DO SOLO EM FUNÇÃO DE
DOSES, VOLUME DE INCORPORAÇÃO E TAMANHO DE PARTÍCULA DO
CALCÁRIO AGRÍCOLA**

LAGES/SC

2023

JÉSSICA DIANDRA STRINGARI

**EFETIVIDADE DA CORREÇÃO DE ACIDEZ DO SOLO EM FUNÇÃO DE
DOSES, VOLUME DE INCORPORAÇÃO E TAMANHO DE PARTÍCULA DO
CALCÁRIO AGRÍCOLA**

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Ciência do Solo, área de concentração em Ciência do solo.
Orientador: Paulo Roberto Ernani

LAGES, SC

2023

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CAV/UEDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Stringari, Jéssica Diandra
EFETIVIDADE DA CORREÇÃO DE ACIDEZ DO SOLO EM
FUNÇÃO DE DOSES, VOLUME DE INCORPORAÇÃO E
TAMANHO DE PARTÍCULA DO CALCÁRIO AGRÍCOLA /
Jéssica Diandra Stringari. -- 2023.
80 p.

Orientador: Paulo Roberto Ernani
Coorientador: Mari Lucia Campos
Tese (doutorado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina,
Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação
em Ciência do Solo, Lages, 2023.

1. Solos ácidos. 2. Calcário agrícola. 3. Nutrição de Plantas. I.
Ernani, Paulo Roberto . II. Campos, Mari Lucia. III. Universidade
do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias,
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. IV. Título.

JÉSSICA DIANDRA STRINGARI
EFETIVIDADE DA CORREÇÃO DE ACIDEZ DO SOLO EM FUNÇÃO DE
DOSES, VOLUME DE INCORPORAÇÃO E TAMANHO DE PARTÍCULA DO
CALCÁRIO AGRÍCOLA

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Ciência do Solo, área de concentração em Ciência do solo.
Orientador: Paulo Roberto Ernani.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: _____

Ph. D. Paulo Roberto Ernani

CAV/UDESC

Membros: _____

Dra. Marlise Nara Ciotta

EPAGRI

Dra. Analu Mantovani

UNOESC

Dra. Mari Lucia Campos

CAV/UDESC

Dr. Milton Cesar Coldebella

CAV/UDESC

Lages, 28 de fevereiro de 2023

Dedico este trabalho aos meus pais, Jane e Adilson, pelo amor, carinho e apoio. Obrigada por estarem sempre ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a todos os meus guias pela oportunidade de viver e aprender todos os dias e serem fonte de inspiração nos momentos de dúvida.

À minha família, principalmente aos meus pais, Adilson Stringari e Jane Grassi, pelo amor e dedicação que sempre tiveram comigo. Obrigada por sempre estarem ao meu lado, me incentivando e auxiliando nas minhas decisões.

Ao professor Paulo Roberto Ernani, que me acolheu como orientada nessa jornada. Obrigada pela amizade, paciência e pelo empenho em ensinar e me mostrar da melhor forma possível o caminho do conhecimento. Também pelo auxílio na realização das atividades a serem desempenhadas, sempre me acompanhando nas atividades de laboratório e na condução dos experimentos, assim como pelo incentivo em mostrar, que apesar das dificuldades, todos somos capazes de aprender, não importa quais sejam as limitações. Finalizo mais essa etapa com felicidade e gratidão, e levarei sempre comigo a inspiração e os valores passados. Foi uma honra trabalhar com um profissional tão dedicado e que inspira pessoas.

À professora Mari Lucia Campos, por fazer parte do comitê de orientação, aos seus conselhos e ensinamentos e principalmente pela amizade. Agradeço também aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, por todo o conhecimento transmitido e pelo comprometimento com o ensino.

Aos amigos e colegas que fiz durante essa trajetória, no Departamento de Solos Recursos Naturais, principalmente aos do Laboratório de Química e Fertilidade do Solo, que de alguma forma me auxiliaram nessa etapa. Agradeço principalmente aos bolsistas Mário Chaves e Leonardo Heinz pelo auxílio nas atividades de pesquisa.

Agradeço aos amigos que estiveram presentes na minha vida e que de alguma maneira foram de grande importância para a minha formação, me apoiando e acreditando nos meus sonhos.

Ao CAV-UDESC e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pelo ensino de qualidade. Agradeço também aos técnicos e servidores que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

À Capes e ao CNPq pela concessão da bolsa e suporte à pesquisa.

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram ou apoiaram minha formação.

RESUMO

A eliminação dos efeitos da acidez tem sido realizada por meio da aplicação de calcário, por ser um produto de ocorrência natural e disponível com facilidade. Contudo, ainda existem lacunas quanto as formas de aplicação, doses e frações granulométricas mais adequadas para o uso desse corretivo. Em virtude dessa problemática, os objetivos do estudo são: (a) avaliar o efeito de doses de calcário e o a profundidade de incorporação na correção da acidez do solo e na disponibilidade de nutrientes; (b) avaliar o efeito das doses e profundidade de incorporação do calcário nos teores nutrientes e na produção de matéria seca das plantas; (c) verificar a eficiência de diferentes frações granulométricas e doses de calcário na correção da acidez do solo. Para isso, foram realizados dois estudos, em casa de vegetação e laboratório, utilizando um Nitossolo Vermelho distroférico, coletado na camada de 0 a 20 cm, entre os municípios de Lages (SC) e Vacaria (RS), em uma área de vegetação nativa. O primeiro foi constituído por dois experimentos, os quais foram conduzidos simultaneamente, em casa de vegetação, no ano de 2019. O experimento I foi composto por quatro doses de calcário (0; 1,5; 3 e 6 t ha⁻¹) as quais foram incorporadas ao volume total de solo contido em vasos com capacidade de 5 kg. No experimento II foi aplicada a dose recomendada pelo método SMP para elevar o pH a 6,0, a qual foi incorporada camadas correspondentes a 1; 2,5; 5; 10 e 20 cm de profundidade, além de um tratamento controle. As mesmas espécies foram utilizadas em ambos os experimentos, sendo o milho nos dois primeiros cultivos e o trigo no terceiro cultivo. Após a coleta do material vegetal (caule e folhas), foram realizadas avaliações da matéria seca da parte aérea (MSPA), além das análises químicas do solo. O segundo estudo foi composto por dois experimentos os quais foram conduzidos em épocas distintas. O primeiro experimento foi conduzido em laboratório onde se incorporou quatro frações granulométricas (2,00-0,84 mm; 0,84-0,30 mm; <0,30 mm e calcário comercial, com duas doses corrigidas para cada granulometria, que corresponderam a 0,50 e 1,0 vez a quantidade recomendada pelo método SMP para elevar o pH-H₂O para 6,0, sendo que a dose integral correspondeu a 9 t ha⁻¹. As amostragens foram realizadas aos 15, 30, 60, 90 e 120 dias após o início da incubação para a determinação do pH-H₂O, pH-SMP e pH-CaCl₂. Já o segundo experimento, foi realizado em casa de vegetação para testar diferentes frações de calcário dolomítico (2,00 -0,84 mm (P20), 0,84-0,30 mm (P50), < 0,30 mm (FP), calcário comercial, combinação P20 + P50, combinação FP + P50) em

plantas de milho, com dose corrigida pelo pH-SMP para elevar o pH para 5,5. Os atributos químicos do solo, teores de nutrientes nos tecidos vegetais e produção de matéria seca foram avaliados após dois ciclos de cultivo. No primeiro estudo, os resultados mostraram a adição das doses de calcário foi responsável pela neutralização do Al^{3+} na solução do solo, e como consequência aumento dos teores de Ca e Mg e do V%. Além disso, no segundo cultivo, as plantas de milho responderam a doses menores do corretivo, com maior produção de MSPA nos tratamentos com 0,25 e 0,50 vezes a dose recomendada pelo SMP. A incorporação de calcário em camadas menores de solo proporcionou redução nos teores de Al^{3+} , ligeiro incremento de pH, Ca^{2+} e soma de bases abaixo das camadas de incorporação e os maiores teores de nutrientes na MSPA foram observados quando se incorporou o calcário nas camadas até 10 e 20 cm. No segundo estudo, o calcário reagiu 100% somente aos 120 dias de incubação na menor fração e na maior dose testada. No cultivo do milho, o pH foi maior nos tratamentos calcário comercial e com a presença de partículas < 0,30 mm, sendo que independentemente do tamanho de partícula ocorreu a mesma tendência na redução da m%, Al^{3+} , H+Al e no incremento de Ca, Mg, V% e soma de bases.

Palavras-chave: Solos ácidos. Componentes da acidez. Nutrição de plantas.

ABSTRACT

Negative effects related to soil acidity has been eliminated through limestone addition, which is a natural and abundant resource. In many circumstances, however, knowledge about rates, application forms and particle size still remain unclear. Due to this problem, the objectives of the study are: (a) to evaluate the effect of limestone rates and the depth of incorporation in soil acidity correction and nutrient availability and dry matter yield; (b) to verify the efficiency of different particle size fractions and limestone rates in soil acidity correction. For this, two studies were carried out, in a greenhouse and laboratory, using a dystrophic Red Nitosol, collected in the 0 to 20 cm soil layer in an area of native vegetation. The first study consisted of two experiments, which were conducted simultaneously in a greenhouse, in 2019. Experiment I consisted of four limestone rates (0; 1.5; 3 and 6 t ha⁻¹) which were incorporated into the total volume of soil contained in pots with a capacity of 5 kg. In experiment II, the liming rate recommended by the SMP method to raise the pH to 6.0 was incorporated in layers corresponding to 1; 2,5; 5; 10 and 20 cm deep, in addition to a control treatment. The same species were used in both experiments, with corn in the first two crops and wheat in the third crop. After the sampling of plant material (stem and leaves), evaluations of shoot dry matter (SDM), nutrient content and dry matter yield were performed, in addition to soil chemical analyses. The second study consisted of two experiments, which were conducted at different times. The first experiment was conducted in a laboratory where four granulometric fractions were incorporated (2.00-0.84 mm; 0.84-0.30 mm; <0.30 mm and commercial limestone, with two corrected rates for each granulometry, which corresponded to 0.50 and 1.0 times the amount recommended by the SMP method to raise the pH-H₂O to 6.0, and the whole rate corresponded to 9 t ha⁻¹. Samples were taken at 15, 30, 60, 90 and 120 days to determine pH-H₂O, pH-SMP and pH-CaCl₂. The second experiment was carried out in a greenhouse to test different fractions of dolomite limestone (2.00 -0.84 mm (P20), 0.84-0.30 mm (P50), < 0.30 mm (FP), commercial limestone, combination of P20 + P50, combination of FP + P50) in corn plants, with a rate recommended by pH-SMP to raise the pH to 5.5. Soil chemical attributes, nutrient contents in plant tissues and dry matter yield were evaluated after two cultivation cycles. In the first study, addition of limestone rates neutralized Al³⁺ in the soil solution, and as increased the levels of Ca, Mg and V%. In addition, in the second crop, corn plants responded to lower rates of the concealer, with higher DMY in treatments with 0.25 and

0.50 times the rate recommended by the SMP. The incorporation of limestone in smaller soil layers decreased Al^{3+} contents, slightly increased pH, Ca^{2+} and the sum of bases below the incorporation layers. The highest nutrient contents in the plant tissue were observed when limestone was incorporated in the layers up to 10 and 20 cm. In the second study, limestone reacted 100% only at 120 days of incubation at the lowest fraction and in the highest rate tested. Corn dry matter yield was not affected by the limestone particle size.

Key-words: Acid soils. Acidity attributes. Plant nutrition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Temperatura média ocorrida (°C) no período de condução do experimento no ano de 2019.....	29
Figura 2 - Esquema das profundidades de incorporação do calcário.	31
Figura 3 - Efeito da aplicação de doses de calcário nos componentes da acidez pH em água (A), alumínio trocável (B), saturação por alumínio (C) e acidez potencial (D) do Nitossolo Vermelho após três cultivos sucessivos de milho e trigo.....	35
Figura 4 - Valores de cálcio (A), magnésio (B), saturação por bases (V%) (C) e soma de bases (D) após a aplicação de doses de calcário em um Nitossolo Vermelho.	38
Figura 5 - Produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) das plantas de milho (A) e (B) e trigo (C), cultivadas em casa de vegetação após aplicação de doses de calcário em um Nitossolo Vermelho.....	41
Figura 6 - Teores de cálcio nos tecidos vegetais das plantas de milho (A) e (B) e trigo (C) cultivadas em casa de vegetação após aplicação de doses de calcário em um Nitossolo Vermelho.	43
Figura 7 - Teores de magnésio nos tecidos vegetais das plantas de milho (A) e (B) e trigo (C) cultivadas em casa de vegetação após aplicação de doses de calcário em um Nitossolo Vermelho.	44
Figura 8 - Produção de matéria seca de raiz (A), comprimento do sistema radicular (B), área superficial (C), Diâmetro (D) e volume (D) de plantas de trigo cultivadas em casa de vegetação após aplicação de doses de calcário em um Nitossolo Vermelho.	48
Figura 9 - Produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) das plantas de milho (A) e (B) e trigo (C), cultivadas em casa de vegetação após aplicação de calcário em diferentes profundidades em um Nitossolo Vermelho.....	56
Figura 10 - Teores de cálcio nos tecidos vegetais das plantas de milho (A) e (B) e trigo (C) cultivadas em casa de vegetação após aplicação de calcário em diferentes camadas de incorporação em um Nitossolo Vermelho.	58
Figura 11 - Teores de magnésio nos tecidos vegetais das plantas de milho (A) e (B) e trigo (C) cultivadas em casa de vegetação após aplicação de calcário em diferentes camadas de incorporação em um Nitossolo Vermelho.	59

Figura 12 - Produção de matéria seca de raiz (A), comprimento do sistema radicular (B), área superficial (C), Diâmetro (D) e volume (D) de plantas de trigo cultivadas em casa de vegetação após incorporação de calcário em um Nitossolo Vermelho.	63
Figura 13- Efeito da aplicação de calcário em diferentes granulometrias sobre o pH em água de um Nitossolo Vermelho distrófico após incubação ao longo de 120 dias.	74
Figure 14 - Efeito da aplicação de calcário em diferentes granulometrias sobre o pH em CaCl_2 de um Nitossolo Vermelho distrófico após incubação ao longo de 120 dias.	77
Figura 15 - Efeito da aplicação de calcário em diferentes granulometrias na $\text{H} + \text{Al}$ de um Nitossolo Vermelho distrófico após incubação ao longo de 120 dias.	79
Figure 16 - Efeito da aplicação de frações granulométricas de calcário nos componentes da acidez pH em água (A), alumínio trocável (B), saturação por alumínio (C) e acidez potencial (D) do Nitossolo Vermelho após dois cultivos sucessivos de milho.....	82
Figure 17 - Valores de cálcio (A), magnésio (B), saturação por bases (V%) (C) e soma de bases (D) após a aplicação de frações granulométricas de calcário em um Nitossolo Vermelho.	84
Figura 18 - Teores de fósforo e potássio do solo após cultivos sucessivos de milho e aplicação de frações granulométricas de calcário em um Nitossolo Vermelho.	86
Figure 19 - Produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) das plantas de milho cultivadas em casa de vegetação após aplicação de frações granulométricas de calcário em um Nitossolo Vermelho.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Teor de Argila e atributos químicos do Nitossolo Vermelho distroférico na camada de 0 a 20 cm.....	30
Tabela 2 - Teores de nitrogênio, fósforo e potássio do solo após cultivos sucessivos de milho e trigo e aplicação de doses de calcário em um Nitossolo Vermelho.	40
Tabela 3 - Teores de nitrogênio, fósforo e potássio nos tecidos vegetais das plantas de milho e trigo cultivadas em casa de vegetação após aplicação de doses de calcário em um Nitossolo Vermelho.....	45
Tabela 4 - Atributos químicos do solo nas camadas corrigidas com calcário e nas camadas subsequentes de um Nitossolo Vermelho distroférico.	50
Tabela 5 - Teores de nitrogênio, fósforo e potássio do solo após cultivos sucessivos de milho e trigo após a aplicação de calcário em diferentes camadas de incorporação em um Nitossolo Vermelho.....	54
Tabela 6 - Teores de nitrogênio, fósforo e potássio nos tecidos vegetais das plantas de milho e trigo cultivadas em casa de vegetação após aplicação de calcário em diferentes camadas de incorporação em um Nitossolo Vermelho.	61
Tabela 7 - Tabela 6: Características químicas e físicas do calcário dolomítico.	68
Tabela 8 - Eficiência relativa (ER%) de reatividade das frações granulométricas do calcário após 120 dias de incubação.....	80
Tabela 9 - Teores de nitrogênio, fósforo e potássio nos tecidos vegetais das plantas de milho cultivadas em casa de vegetação após aplicação frações granulométricas de calcário em um Nitossolo Vermelho.....	89

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	15
1.1	OBJETIVOS	17
1.2	HIPÓTESES	17
2	REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1	ORIGEM E TIPOS DE ACIDEZ DO SOLO	18
2.2	CORREÇÃO DA ACIDEZ DO SOLO.....	21
2.3	LEGISLAÇÃO BRASILEIRA DOS CORRETIVOS DO SOLO	24
3	CAPÍTULO I - correção de acidez do solo em função de doses E PROFUNDIDADES DE INCORPORAÇÃO de calcário agrícola em solos altamente tamponados	26
3.1	RESUMO	26
3.2	INTRODUÇÃO	27
3.3	MATERIAL E MÉTODOS	28
3.3.1	Análises químicas do solo antes da incubação com calcário	29
3.3.2	Incubação do solo.....	30
3.3.3	Implantação e descrição dos tratamentos	30
3.3.4	Amostragem e análises do tecido vegetal de plantas de milho e trigo	32
3.3.5	Análises químicas do solo	33
3.3.6	Análises estatísticas.....	33
3.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
3.4.1	Experimento I - Doses de Calcário.....	34
3.4.2	Experimento II – Profundidades de Incorporação do Calcário	49
3.5	CONCLUSÕES.....	64
4	CAPÍTULO II - INFLUÊNCIA DAS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS DE CALCÁRIO NA CULTURA DO MILHO E NA NEUTRALIZAÇÃO DA ACIDEZ DO SOLO	65
4.1	RESUMO	65
4.2	INTRODUÇÃO	66
4.3	MATERIAL E MÉTODOS	67

4.3.1	Solo e análises de caracterização.....	67
4.3.2	Descrição dos tratamentos, análises químicas e análise estatística	69
4.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	72
4.4.1	Experimento I - Eficiência Relativa das Frações Granulométricas de Calcário..	72
4.4.2	Experimento II - influência das frações granulométricas na cultura do milho....	81
4.5	CONCLUSÕES.....	89
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

1 INTRODUÇÃO GERAL

No Brasil 70% das terras agrícolas são naturalmente ácidos e apresentam limitações para o desenvolvimento e estabelecimento dos sistemas de produção de grande parte das culturas agrícolas em até 40% (CASTRO; CRUSCIOL, 2015). A área afetada pela acidez é estimada em 4 bilhões de hectares, o que representa aproximadamente 30 % da área total de terra livre de gelo do mundo (VON UEXKÜLL; MUTERT, 1995). A acidez do solo e o baixo desempenho produtivo estão, de modo geral, ligados à presença de formas trocáveis e fitotóxicas de alumínio (Al^{+3}) e manganês (Mn^{+2}) na solução de solos com o pH inferior a 5,5 bem como a baixa disponibilidade de bases trocáveis, e baixa saturação por bases (BISCARO et al., 2011), comprometendo o desenvolvimento do sistema radicular e prejudicando a disponibilidade e a absorção de nutrientes, consequentemente restringindo o rendimento da maioria das culturas de interesse econômico (RUTKOWSKA et al., 2014; BRIGNOLI et al., 2020).

O processo natural de acidificação do solo pode ser derivado em grande parte pela lixiviação de cátions de reação básica (Ca, Mg, Na e K), acentuado processo de intemperismo dos minerais do solo, adição de fertilizantes nitrogenados, excesso de absorção de cátions pelas plantas, acúmulo da matéria orgânica, por conter inúmeros grupos funcionais ácidos, dos quais os íons H^+ podem se dissociar na solução do solo, entre outros (ALVAREZ et al., 2009; DONG et al., 2022).

Para minimizar os efeitos negativos da acidez, é necessária a adoção de técnicas que visam a melhoria das propriedades químicas do solo, mantendo o pH e os teores de Ca e Mg em níveis que sejam considerados adequados e reduzindo os teores de Al e Mn tóxicos (GONÇALVES et al., 2011). Dentre os diversos materiais empregados para a correção do solo, encontram-se os calcários, que são os mais utilizados pelos produtores, pois são de ocorrência natural e disponíveis a preços baixos. São rochas, na maioria sedimentares, que apresentam carbonatos de cálcio e magnésio (dolomita) em concentrações variáveis. No entanto, é um produto que apresenta baixa solubilidade em água e depende da umidade, dose e da superfície específica adequada para manter contato com as partículas do solo (CASTRO et al., 2011).

Devido às suas características, a reação do calcário é restrita a uma pequena distância do local da aplicação. Assim, seu benefício máximo é obtido com a aplicação antecipada, distribuição uniforme e a incorporação com o solo. Entretanto, a incorporação do calcário com o solo, mediante revolvimento, altera as características físicas favoráveis ao solo, não sendo desejável em sistemas com pouco ou nenhum revolvimento do solo, como acontece com o sistema plantio direto (SPD). Nesse contexto, tem aumentado o interesse por alternativas para o estabelecimento de culturas no SPD, sem a incorporação prévia de calcário, realizando-se a calagem superficialmente (SORATTO; CRUSCIOL et al., 2008). Dessa forma, diversos trabalhos têm demonstrado o efeito positivo da calagem aplicada em superfície para a correção das camadas subsuperficiais, que varia de acordo com a dose, granulometria, forma de aplicação, tipo de solo, condições climáticas, sistema de cultivo, entre outras características.

Outro ponto importante a ser levado em consideração quanto a aplicação de calcário são as características físicas e químicas do corretivo, pois são elas que influenciam a sua reatividade e poder de neutralização da acidez do solo. A reatividade do corretivo depende da concentração de componentes básicos presentes no material e de sua granulometria após a moagem (RATKE et al., 2021). Assim, a granulometria assume um papel importante, pois calcários com partículas mais grosseiras reagem mais lentamente, e podem possuir maior efeito residual no solo que os calcários finamente moídos (QUAGGIO, 2000).

Além disso, o tempo de reação do calcário no solo também pode variar de acordo com a dose aplicada. Contudo, os solos apresentam grandes variações dentro de uma mesma região, principalmente quanto às suas características químicas. A quantidade do corretivo necessária para neutralizar a acidez, não está somente relacionada ao pH, mas também do poder tampão do solo. Dessa forma, altas doses de calcário são necessárias em solos com alta capacidade de tamponamento, devido à resistência do solo à alteração do seu pH.

Portanto, há necessidade de estudos que satisfaçam todos os questionamentos relacionados à correção da acidez do perfil do solo, a fim de determinar qual forma de aplicação, doses e granulometrias mais viáveis para a implantação e manutenção dos sistemas produtivos. Considerando o exposto, o trabalho objetivou avaliar a resposta de doses de calcário e profundidade de incorporação na correção da acidez do solo, disponibilidade e teores de nutrientes. Além disso, avaliar a eficiência de diferentes frações granulométricas e doses de calcário na correção da acidez do solo.

1.1 OBJETIVOS

Avaliar o efeito de doses de calcário e das profundidades de incorporação na neutralização da acidez do solo e na disponibilidade de nutrientes às plantas;

Avaliar o efeito das doses e profundidades de incorporação do calcário nos teores de nutrientes e na produção de matéria seca das plantas;

Verificar a eficiência de diferentes frações granulométricas e doses de calcário na neutralização da acidez do solo e na produção de matéria seca do milho.

1.2 HIPÓTESES

A dose de calcário a ser aplicada em solos altamente tamponados pode ser menor do que a recomendada atualmente.

A profundidade de incorporação de calcário em solos altamente tamponados pode ser inferior à atualmente recomendada.

As frações menos reativas do calcário são tão eficientes quanto as frações mais reativas, quando aplicadas em solos ácidos do sul do Brasil.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ORIGEM E TIPOS DE ACIDEZ DO SOLO

A intensa degradação dos solos agrícolas no mundo tem despertado a preocupação com a qualidade do solo e a sustentabilidade da exploração agrícola. Diante disso, a ciência tem buscado indicadores que expressem a intensidade desses processos degradativos, o que permite o monitoramento de mudanças a médio e longo prazo (GUIMARÃES et al., 2015). Dentre os diversos indicadores relacionados à qualidade do solo, a acidez destaca-se como um dos mais problemáticos, em decorrência da baixa saturação por bases (V%), do aumento da toxidez por alumínio trocável (Al^{3+}) e manganês (Mn) e da baixa capacidade de troca de cátions (HOLZSCHUH, 2007). Além disso, pode gerar a deficiência de cálcio e magnésio (Ca e Mg) e prejudicar a disponibilidade de vários nutrientes, incluindo nitrogênio, fósforo e potássio, e assim restringir o crescimento e o desenvolvimento das plantas, sendo capaz de afetar o rendimento das culturas (CORRÊA et al., 2006).

Segundo Guimarães et al. (2015), a acidez excessiva é um dos principais fatores limitantes ao incremento da produção agrícola mundial. A queda no rendimento das culturas comerciais, no decorrer dos cultivos, tem sido um motivo de preocupação constante para os agricultores, especialmente em regiões tropicais, como o Brasil. A área total afetada pela acidez é estimada em 4 bilhões de hectares, representando aproximadamente 30% a 40% da área mundial cultivada (SUMNER; NOBLE, 2003; KOCHIAN et al., 2015). As áreas mais afetadas estão principalmente em países localizados nos trópicos, que compreendem Latossolos e Argissolos na América do Sul e Latossolos na África (NARRO et al., 2001). Estima-se que no Brasil, aproximadamente 70% do território seja composto por solos de caráter ácido, capazes de reduzir o potencial produtivo das culturas em cerca de 40%, principalmente devido às elevadas concentrações de Al^{3+} solúvel (QUAGGIO, 2000).

O processo de acidificação do solo pode ter origem em vários fatores, dentre eles o intemperismo, que ocorre em locais úmidos e com boa drenagem. Nessas áreas verificam-se intensa remoção e lixiviação de cátions de reação básica da CTC do solo, principalmente, Ca, Mg, K e Na, resultando em um acúmulo de Al^{3+} nas cargas elétricas negativas. Devido à hidrólise do Al^{3+} , ocorre a disponibilização de íon H^+ , causando a

acidificação do meio. Nessas áreas, é muito comum encontrar solos com valores de pH menores que 5,0 (MELO; ALLEONI, 2019).

A exploração agrícola também é um fator gerador de acidez do solo, pois durante o processo de absorção dos nutrientes, as plantas liberam, na rizosfera, íons H^+ ou OH^- , conforme realizam a absorção, respectivamente, de um cátion ou um ânion, para manter a eletronegatividade. Esse processo é mais intenso nas leguminosas, que absorvem mais cátions, como Ca^{2+} e Mg^{2+} , quando comparado às gramíneas, resultando em uma maior liberação de íons H^+ no solo, contribuindo para a acidificação. Devido à nodulação eficiente, as leguminosas não absorvem tanto nitrato quanto as gramíneas, favorecendo o acúmulo dos íons H^+ na rizosfera (MEURER, 2010; GOULDING, 2016). Além disso, o manejo realizado de forma inadequada pode acarretar na erosão do solo, que por sua vez acaba expondo os horizontes subsuperficiais que são, no geral, os mais ácidos (SOUSA et al., 2007).

Os adubos nitrogenados utilizados na adubação das culturas também podem provocar a acidificação do solo através de processos químicos e orgânicos ocorridos no solo pelo do ciclo do nitrogênio na natureza. A utilização de fertilizantes amoniacais pode contribuir para o efeito acidificante devido à nitrificação, que consiste na transformação do N amoniacal (NH_4^+) em N nítrico (NO_3^-) na presença de oxigênio, podendo produzir ao final da reação um ou dois íons H^+ para cada molécula de amônio nitrificada (ERNANI, 2016). O acúmulo de matéria orgânica é outra maneira de acidificação do solo, pois tende a formar complexos solúveis com cátions não ácidos (que são nutrientes, como Ca^{2+} e Mg^{2+}), facilitando a sua perda através da lixiviação. Além disso, a matéria orgânica contém numerosos grupos funcionais ácidos dos quais os íons H^+ podem se dissociar na solução do solo (BRADY; WEIL, 2013).

De acordo com Brady; Weil (2013), a acidez e a alcalinidade são o resultado do balanço entre íons de hidrogênio H^+ e de hidroxilas (OH^-), que são quantificados, através da escala de pH. Deste modo, um dos principais processos que promovem a acidificação do solo é a produção de íons H^+ na solução. A acidez do solo é derivada do equilíbrio entre os fatores intensidade, quantidade ou poder tampão dessa acidez. O fator intensidade refere-se à concentração efetiva de H^+ na solução do solo. O fator quantidade relaciona-se à concentração de H^+ e de Al^{3+} (entre outros cátions de caráter ácido) adsorvidos aos colóides e que podem ser desorvidos da fase sólida como consequência da neutralização e precipitação desses cátions na solução do solo (SOUSA et al., 2007)

A acidez do solo, portanto, pode ser dividida nos seguintes componentes: acidez ativa e acidez potencial. A acidez ativa refere-se à concentração dos íons H^+ na solução do solo. É ela que afeta o desenvolvimento das plantas e quase todas as reações que ocorrem no solo que estejam correlacionadas com a disponibilidade de nutrientes. A acidez ativa é expressa nos laudos de análise de solo pelo valor de pH, determinado numa suspensão de solo com água destilada ou com soluções salinas, normalmente cloreto de cálcio $0,01\text{mol L}^{-1}$.

A acidez potencial corresponde às substâncias ou compostos aptos a liberarem H^+ para a solução do solo, principalmente o Al^{3+} adsorvido às cargas negativas presentes nas argilas e nos grupos funcionais COOH e OH da matéria orgânica (MEURER, 2010). Ela é, portanto, proporcional aos teores de alumínio, argila e matéria orgânica, existentes no solo, e determina a necessidade de calcário. A acidez potencial pode ser representada pelos valores de (H+Al) ou pelo método de pH-SMP (ERNANI, 2016). Este último, trata-se de uma solução tamponada a pH 7,5 e que funciona adequadamente para amostras de solo com alto teor de matéria orgânica. Por essa razão, o pH-SMP é o método oficial adotado por alguns estados da região sul do Brasil (Rio Grande do Sul e Santa Catarina) para a determinação da acidez potencial e conseqüentemente para determinar a necessidade de calcário dos solos agrícolas da região.

O grau de acidez do solo é uma variável química importante e que influencia de inúmeras maneiras a dinâmica do sistema, além de fornecer altos teores de alumínio tóxico às plantas. A atividade de Al^{3+} e de suas demais espécies depende principalmente do tipo de mineral da fase sólida. Em solos tropicais, com predominância de argilominerais do tipo 1:1 (caulinita) e óxidos de ferro na fração argila, a atividade de Al^{3+} aumenta (INDA JUNIOR et al., 2007; COSTA et al., 2019). Nesse caso, em solos com pH menor que 5,0, o alumínio tóxico inibe rapidamente o crescimento radicular e afeta a absorção de água e nutrientes, o que é desfavorável para o desenvolvimento das plantas mais sensíveis a esse elemento. Isso afeta a produção agrícola, pois ocorre a potencialização dos efeitos nocivos e deletérios às culturas, pois para a obtenção de altos rendimentos necessita-se de substratos que possibilitem o desenvolvimento das raízes sem nenhum obstáculo, seja ele físico ou químico (ECHART; CAVALLI-MOLINA, 2001; RAHMAN et al., 2018).

2.2 CORREÇÃO DA ACIDEZ DO SOLO

Dentre os fatores ambientais do solo, aqueles ligados à acidez (pH, saturação por bases, acidez potencial e solubilidade de nutrientes) são os que mais interferem na produtividade agrícola, principalmente nas regiões tropicais e subtropicais (NATALE et al., 2012).

Para que se possa fazer o uso desses solos, há necessidade da adoção de práticas agrícolas que visam à melhoria das propriedades químicas por meio da adição de corretivos da acidez. Os materiais que podem ser utilizados na correção de solos ácidos são aqueles que possuem componentes básicos, tais como óxidos, hidróxidos, silicatos e carbonatos (RAMOS et al., 2006). A correção da acidez do solo, através da aplicação de calcário (CaCO_3 e MgCO_3), está entre as práticas agrícolas mais utilizadas e difundidas, pois quando realizada de maneira correta e adequada, aumenta os teores de nutrientes, contribuindo para o aumento da produtividade das culturas, em virtude da melhoria nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (FREIRIA et al., 2008; BARRETO et al., 2008; RAIJ, 2011).

A calagem pode desencadear vários processos no solo. Em virtude do aumento do pH, pode aumentar as concentrações de Ca^{+2} e Mg^{+2} na solução e nas cargas elétricas, diminuir e até eliminar a concentração de Al trocável (Al^{+3}), pois este irá se ligar às hidroxilas adicionadas ao solo e o Al passa a existir sob a forma de $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, que não é tóxica às plantas; o mesmo acontece com o Mn^{+2} , que se oxida e precipita. Promove também o aumento dos teores de nutrientes e propicia maior desenvolvimento do sistema radicular das plantas, melhorando a eficiência de uso desses nutrientes e da água que estão no solo (BOLAN et al., 2011).

Além disso, o calcário é um insumo agrícola de ocorrência natural e disponível com facilidade, devido a sua abundância e distribuição geográfica (MALAVOLTA, 2006). De acordo com Natale et al. (2012), entre os recursos minerais brasileiros, o calcário encontra-se em primeiro lugar, ocupando posição privilegiada, cujas reservas medidas são de aproximadamente 53 bilhões de toneladas, bem distribuídas pelo território nacional. No entanto, trata-se de um produto de baixa solubilidade em água e com alta variabilidade de partículas que o compõem, o que lhe confere diferentes capacidades de neutralizar a acidez ao longo do tempo. Portanto, quanto menor a granulometria do calcário, mais rapidamente será sua reação com o solo, desde que este esteja úmido (BORTOLUZZI et al., 2014).

Desse modo, alguns aspectos devem ser observados na escolha do corretivo, principalmente em relação à sua qualidade e suas características químicas, como o teor e do tipo de compostos neutralizantes, e granulometria. A qualidade é expressa pelo PRNT (Poder Relativo de Neutralização Total), quanto mais alto o valor, maior o poder de neutralização, (TEDESCO; GIANELLO, 2000; ALCARDE; RODELLA, 2003).

Por se tratar de um produto de baixa solubilidade, mobilidade restrita e velocidade de reação, a ação da calagem normalmente fica restrita às camadas superficiais do solo, principalmente se ele não é incorporado ao solo (CAIRES et al., 1998). Quando a calagem é realizada na superfície do solo, como acontece no sistema plantio direto (SPD), os efeitos na correção da acidez e na melhoria de outros atributos químicos limita-se a poucos centímetros abaixo da superfície (CHURKA et al., 2013). Contudo, o revolvimento do solo para a incorporação de corretivos não é desejável, especialmente no (SPD), pelo fato da mobilização destruir atributos físicos favoráveis, do ponto de vista da conservação, obtidos ao longo do tempo de adoção do referido sistema (ALLEONI et al., 2005).

Dessa forma, a aplicação superficial de calcário, sem incorporação, tem sido o procedimento mais comumente utilizado por agricultores para corrigir a acidez do solo em condições de cultivo mínimo, principalmente no SPD. De acordo com Freiria et al. (2008), é crescente na literatura o número de relatos que abordam a redução da acidez e a melhoria das condições de fertilidade na subsuperfície, em consequência da aplicação de calcário sem incorporação. Porém, a correção da acidez em profundidade depende de vários fatores, tais como dose do corretivo, granulometria e reatividade do calcário, frequência da calagem, tempo transcorrido após a calagem, poder tampão do solo e precipitação pluvial (MIRANDA et al., 2005; CAIRES et al., 2008).

Em pesquisas anteriores encontrou-se que a aplicação de corretivos da acidez em superfície possui eficiência comprovada, principalmente nas camadas até 10 cm, e, em alguns casos, pode mitigar a acidez a uma profundidade de 20 cm ou até mais, maximizando assim a produtividade das culturas (AMARAL et al., 2004; CAIRES et al., 2006; JORIS et al., 2013). Em um estudo, Caires et al. (2005a) verificaram que o calcário aplicado em superfície no SPD no sul do Brasil foi eficaz para reduzir a acidez do solo em profundidade, sendo que os efeitos da calagem superficial foram significativos na camada de 0 a 5 e 5 a 10 cm após um ano, e, também, a uma profundidade de 10 a 20 cm a partir de dois anos e meio, permanecendo por um período de até 10 anos após a calagem.

Estudos de curto prazo mostraram que os efeitos da melhoria da acidez do subsolo por calagem superficial em sistemas de plantio direto podem ser mediados por resíduos de plantas de cobertura deixados na superfície do solo como cobertura morta (FRANCHINI et al., 2003). Já Caires et al. (2000) citam outros mecanismos para explicar o efeito de neutralização da acidez em profundidade decorrentes da aplicação de calcário na superfície: a formação e a migração de $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ e $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ para camadas mais profundas do solo, e o deslocamento de partículas de calcário por meio de canais formados por raízes mortas, mantidos intactos em razão da ausência de preparo de solo. Desta forma, a preservação das características físicas e do ambiente contribuem para a migração do calcário no SPD. A ausência de mobilização do solo e a cobertura vegetal mantêm os canais contínuos construídos e estabilizados pela atividade biológica, o que permite maior infiltração de água que está geralmente acompanhada com os produtos da dissolução do calcário, neutralizando a acidez e aumentando os cátions básicos em subsuperfície.

Outro mecanismo envolvido na ação subsuperficial do calcário é a formação de uma frente alcalinizante, descrita por Rheinheimer et al. (2000). De acordo com os autores, os efeitos da calagem só ocorreram em profundidade após o pH na zona de dissolução do calcário ter atingido valores de 5,2 a 5,5. A explicação para esse fato é que a dissociação do calcário, em solo ácido, promove a liberação de ânions (OH^- e HCO_3^-), os quais reagem com os cátions de reação ácida da solução do solo (H^+ , Al^{3+} , Fe^{2+} , Mn^{2+}), e essa reação ocorre até pH em torno de 5,5.

Além de efeitos positivos no solo, a calagem superficial pode também ser benéfica para o desenvolvimento das plantas. Caires et al. (2005b) obtiveram aumento na produtividade do trigo de $1,25 \text{ t ha}^{-1}$ para $3,75 \text{ t ha}^{-1}$ 10 anos após calagem superficial, em safra com déficit hídrico. Joris (2011) observou aumento nos teores foliares de P, Ca e Mg em milho, quatro anos após calagem em superfície, com máxima produtividade estimada pela aplicação de $9,2 \text{ t ha}^{-1}$ calcário, propiciando rendimento 42% superior ao da testemunha, em condição de estresse hídrico.

No entanto, existem controvérsias sobre a eficácia da aplicação superficial em relação à aplicação incorporada de calcário em solos ácidos. Portanto, há necessidade de novos estudos sobre o assunto, a fim de determinar qual forma de aplicação é mais viável para alterar os atributos químicos relacionados com a acidez do solo e qual gera menores custos e maior retorno aos produtores.

2.3 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA DOS CORRETIVOS DO SOLO

O corretivo mais comumente utilizado no Brasil é o calcário, derivado da moagem de rochas calcárias, que podem ser sedimentares ou metamórficas. Os constituintes predominantes são o carbonato de cálcio (CaCO_3) e o carbonato de magnésio (MgCO_3) (PARAHYBA, 2013).

Os corretivos da acidez do solo seguem uma legislação contida na Instrução Normativa nº 35, de 04 de julho de 2006, do Ministério da Agricultura, Pecuária e abastecimento – MAPA. Para serem considerados como corretivos da acidez, precisam apresentar atributos químicos e físicos que os classifiquem assim. Além disso, prevê especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos corretivos de acidez, de alcalinidade e de sodicidade (BRASIL, 2006). Os valores mínimos de referência previstos pela lei são de 45% para o PRNT, 67% para o poder de neutralização (PN) e de 38% para a soma de óxidos (%CaO + %MgO).

Para que um material seja considerado corretivo de acidez, alguns condicionantes devem ser observados para determinar a qualidade desses materiais. O poder de neutralização (PN) é a capacidade potencial do corretivo em neutralizar a acidez e é expressa em teor de neutralizante equivalente ao CaCO_3 presente na amostra. O Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT) que expressa a eficiência de calcários corretivos agrícolas é estabelecido em relação ao PN e à Reatividade das partículas – RE. De acordo com a legislação, o valor de PRNT considera a proporção de corretivo que neutraliza efetivamente a acidez após 3 meses de sua aplicação (BRASIL, 2006). Já a reatividade (RE) de um corretivo, que é a velocidade de sua reação no solo, depende das condições de clima e de solo, da natureza química do corretivo e principalmente da sua granulometria. A fração maior do que 2 mm (retida na peneira ABNT nº 10) apresenta reatividade zero na correção da acidez. A reatividade é estimada em 20% para a fração que passa na peneira ABNT nº 10 e fica retida na peneira ABNT nº 20; a reatividade de 60% é estimada para a fração que passa na peneira ABNT nº 20 e fica retida na peneira ABNT nº 50, e reatividade de 100% é estimada para a fração que passa na peneira ABNT nº 50.

De acordo com a legislação brasileira, no mínimo, 95% do calcário deve passar na peneira com malha de 2 mm (ABNT nº10), 70% na peneira com malha de 0,84 mm (ABNT nº 20) e 50% na peneira com malha de 0,30 mm (ABNT nº 50). Portanto, há tolerância de 5% de material que não terá reação no solo (PRIMAVESI; PRIMAVESI,

2004). O calcário denominado filler, por possuir granulometria bem mais fina do que 0,30 mm (peneira nº 50), deve ter reatividade relativa superior a 100%. Estes apresentam granulometria fina, e, portanto, a ação desses produtos é rápida, normalmente entre 10 a 15 dias.

3 CAPÍTULO I - CORREÇÃO DE ACIDEZ DO SOLO EM FUNÇÃO DE DOSES E PROFUNDIDADES DE INCORPORAÇÃO DE CALCÁRIO AGRÍCOLA EM SOLOS ALTAMENTE TAMPONADOS

3.1 RESUMO

O calcário é um material amplamente utilizado na correção da acidez do solo. Contudo, as pesquisas ainda não são muito claras e ainda existem algumas lacunas quanto a recomendação de doses e modos de aplicação, principalmente em solos altamente tamponados. Em virtude dessa problemática, os objetivos do estudo são, (a) avaliar a resposta de doses e profundidades de incorporação do calcário nos componentes da acidez, e na disponibilidade de nutrientes no solo; (b) avaliar o efeito das doses e profundidades de incorporação do calcário no teor de nutrientes e na produção de matéria seca das plantas de milho e trigo. Para isso, plantas de milho e trigo foram cultivadas em vasos, sendo que o solo utilizado foi o Nitossolo Vermelho distroférico, coletado na camada de 0 a 20 cm entre os municípios de Lages (SC) e Vacaria (RS), em 2019. O estudo foi composto por dois experimentos conduzidos concomitantemente em casa de vegetação. O primeiro experimento foi composto por doses de calcário equivalentes a 0, 0,25, 0,50 e 1,0 vezes a quantidade recomendada pelo índice SMP para elevar o pH a 6,0, as quais foram incorporadas ao volume total de solo contido em vasos com capacidade de 5 kg. No segundo experimento a dose recomendada para elevar o pH a 6,0 foi incorporada em camadas a partir da superfície, correspondendo a 1; 2,5; 5; 10 e 20 cm de profundidade, além de um tratamento controle. A adição das doses de calcário foi responsável pela redução do Al trocável na solução do solo, aumento dos teores de Ca e Mg e da saturação por bases (V%). Além disso, no segundo cultivo, as plantas de milho responderam a doses menores do corretivo, com maior produção de MSPA nos tratamentos com 0,25 e 0,50 vezes a dose recomendada pelo SMP. A incorporação de calcário em camadas superficiais do solo proporcionou redução nos teores de Al^{3+} , incremento de pH, Ca^{2+} e soma de bases na camada subsequente de incorporação e os maiores teores de nutrientes na MSPA foram observados quando se incorporou o calcário nas camadas até 10 e 20 cm.

Palavras-chave: Solos ácidos. Nutrição de plantas. Correção da acidez

3.2 INTRODUÇÃO

Os processos de intemperismo, assim como a composição mineralógica, imprimem aos solos brasileiros um caráter ácido, incluindo os solos da região sul (ERNANI; ALMEIDA 1986). A maior parte das limitações para o estabelecimento e desenvolvimento dos sistemas produtivos está associada a presença de concentrações tóxicas de alumínio (Al^{3+}) e manganês (Mn^{2+}), além dos baixos teores de cátions básicos, como o cálcio (Ca^{2+}) e o magnésio (Mg^{2+}), e da baixa soma e saturação por bases (CUNHA et al., 2018). Com isso, é necessário realizar a correção do pH e neutralização do Al^{3+} , para melhorar as características de fertilidade do solo e seja possível alcançar altos tetos produtivos nas culturas de interesse agrícola.

A adição de calcário é apontada como a alternativa mais utilizada para neutralizar a acidez do solo e permitir o adequado desenvolvimento das culturas. A calagem proporciona inúmeros benefícios, tais como, o aumento do pH, fornecimento de Ca e Mg e neutralização do Al^{3+} , propiciando o melhor desenvolvimento das raízes e maior eficiência de uso da água e dos nutrientes do solo (; RAIJ, 2001; COLDEBELLA et al., 2018). No entanto, para aumentar a sua eficiência, alguns pontos quanto ao manejo devem ser levantados em consideração.

Solos de textura argilosa ou com altos teores de matéria orgânica, apresentam alto poder de tamponamento, pois os pontos de troca dos colóides orgânicos e minerais funcionam como receptores e fornecedores de H^+ , fazendo com que o solo resista ao aumento do pH (COLDEBELLA et al., 2018; YAO et al., 2009). As características do solo que estão associadas com o poder de tamponamento são responsáveis pela necessidade de aplicação de altas taxas de calcário, que acaba gerando custos muito elevados e às vezes torna-se inviável para os produtores que estão no início do processo produtivo (ERNANI; ALMEIDA, 1999).

Além disso, o calcário é um material pouco solúvel e precisa estar em contato com o solo para reagir. Dessa forma, com a adoção do SPD, aumentou-se o interesse por alternativas que utilizem pouco ou nenhum revolvimento do solo, uma vez que o calcário possui mobilidade limitada e seus efeitos geralmente, se restringem às camadas superficiais do solo, o que acaba reduzindo a eficiência da neutralização da acidez em camadas mais profundas do solo (CASTRO et al., 2011; DEUS et al., 2013). Apesar das suas características, quanto a solubilidade e mobilidade no solo, existe uma série de pesquisas que comprovam a eficiência da calagem superficial na neutralização da acidez

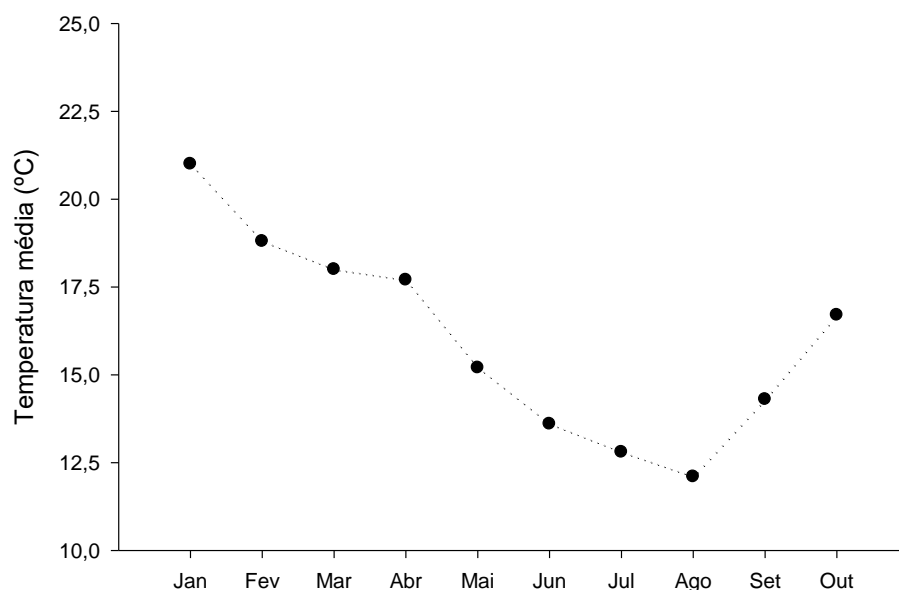
de camadas subsuperficiais (FREIRIA et al., 2008; CAIRES et al., 2015; CASTRO et al., 2015).

Tendo em vista os problemas relacionados aos solos ácidos e o alto custo para mitigar os seus efeitos, é fundamental a realização de estudos que satisfaçam os questionamentos relacionados a correção da acidez, a fim de determinar doses e formas de aplicação do corretivo com o intuito de tornar os sistemas produtivos mais sustentáveis e economicamente viáveis. Desse modo, o estudo objetivou avaliar o efeito da aplicação de doses e profundidade de incorporação do calcário na neutralização da acidez, na disponibilidade de nutrientes no solo, bem como nos teores de nutrientes e na produção de matéria seca das plantas.

3.3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi constituído por dois experimentos, os quais foram conduzidos concomitantemente em casa de vegetação, em 2019, no Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), em Lages, SC (27° 48' 58" S e 50° 19' 34" W), que tem altitude de 884 m, clima do tipo Cbf, segundo a classificação de Köppen, apresentando clima quente e temperado, com temperatura média de 16,6°C. As variações de temperatura ocorridas durante o período de condução do experimento estão apresentadas na Figura 1.

Figura 1 - Temperatura média ocorrida (°C) no período de condução do experimento no ano de 2019.



Fonte: Elaborada pela autora, 2022

3.3.1 Análises químicas do solo antes da incubação com calcário

Utilizou-se um Nitossolo Vermelho distroférico, coletado na camada de 0 a 20 cm, às margens da BR 116, em uma área de vegetação nativa, e, portanto, nunca antes corrigida ou adubada. As amostras de solo foram secas ao ar, em casa de vegetação, destorroadas, moídas e passadas em peneiras com malha de 4 mm. Para as análises químicas, utilizaram-se amostras peneiradas em malha de 2 mm. Após o processamento das amostras, foram realizadas análises para a caracterização do solo, conforme proposto por Tedesco et al. (1995). As propriedades químicas do solo estão apresentadas na Tabela 1. Os cálculos para estabelecer a necessidade de calcário foram realizados com base nas recomendações da Comissão de Química e Fertilidade do Solo para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (CQFS-RS/SC, 2016).

Tabela 1- Teor de Argila e atributos químicos do Nitossolo Vermelho distroférico na camada de 0 a 20 cm.

pH _{H2O}	SMP	MO	Argila	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	CTC _{pH7}
		--- % ---		---mg dm ⁻³ ---		----- cmol _c dm ⁻³ -----				
5,3	5,5	1,13	75	0,7	40	0,75	0,35	2,3	11,3	15

pH: pH do solo em água; SMP: pH do solo em solução tamponada; MO: matéria orgânica; P: fósforo disponível; K⁺: potássio disponível; Ca²⁺: cálcio trocável; Mg²⁺: magnésio trocável; Al³⁺: acidez trocável; H+Al: acidez potencial; V: saturação por bases; e, CTC_{pH7}: capacidade de troca de cátions a pH 7,0.
Fonte: Elaborado pela autora, (2022).

3.3.2 Incubação do solo

O solo foi submetido à aplicação de quatro doses de calcário, preparado em laboratório por meio da mistura de carbonato de cálcio (CaCO₃) e carbonato de magnésio (MgCO₃) na proporção 3:1, que corresponderam a 0; 0,25; 0,50 e 1,0 vez a quantidade recomendada pelo método SMP para elevar para 6,0 o pH-H₂O da camada superficial do solo. A dose integral (1,0 SMP) correspondeu a 6 t ha⁻¹. As doses foram aplicadas em 20 kg de solo (base seca). Após a homogeneização do calcário, o solo foi umedecido com água destilada para elevar a capacidade de campo até 80%. Em seguida, o solo foi acondicionado em sacos plásticos de 50kg, capazes de permitir as trocas gasosas e cobertos por lona preta para o processo de incubação durante um período de 50 dias. Esse processo foi necessário para possibilitar a reação do calcário com o solo, até a estabilização dos valores de pH.

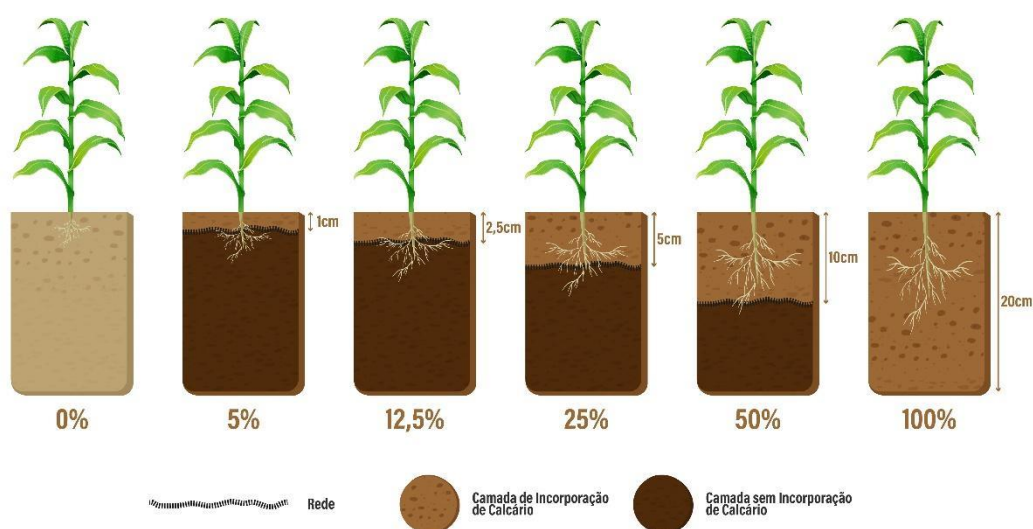
3.3.3 Implantação e descrição dos tratamentos

Posteriormente ao período de incubação, foi realizada a adubação sobre os 20 kg de solo de cada tratamento. Aplicou-se a mesma dose de NPK em todos os tratamentos, cujas quantidades foram: 120 mg kg⁻¹ de P₂O₅ e 150 mg kg⁻¹ de K₂O, via sólida, na forma de fosfato monopotássico (KH₂PO₄ 51% de P₂O₅ e 33% K₂O). Para a adubação nitrogenada, foi utilizada solução de ureia (45%), adicionando-se 100 mg kg⁻¹ de N no primeiro cultivo de milho; no início do segundo cultivo, foi realizada apenas a adubação de manutenção do P na semeadura, com a aplicação de 100 mg kg⁻¹ na forma de

superfosfato triplo. Findada essa etapa, o solo de cada tratamento foi dividido em quatro porções de 4 kg, base seca, (repetições) e foi acondicionado em vasos plásticos com capacidade de 6 litros, para a condução dos cultivos na sequência.

Nos dois experimentos, foram realizados três cultivos, sendo os dois primeiros com milho (*Zea Mays L.*) e o terceiro com trigo (*Triticum aestivum L.*). Para o milho foi usada a cultivar Supremo TG; para o trigo, a cultivar BRS Sossego. Os dois cultivos de milho foram realizados de janeiro a março e de abril a junho, respectivamente; o de trigo foi de agosto a outubro. Utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), com quatro repetições, totalizando 16 vasos para cada experimento. O primeiro experimento foi constituído por quatro doses de calcário sendo 0; 0,25; 0,50 e 1,0 vez a recomendação do método SMP para elevar o pH até 6,0, e foram equivalentes a 0; 1,5; 3 e 6 Mg ha⁻¹ respectivamente. Elas foram incorporadas ao volume total de solo contido em cada vaso. No segundo experimento, foi aplicada a dose proporcional a 100% da recomendada pelo método SMP (6 t ha⁻¹), porém incorporada em camadas a partir da superfície de 5%; 12,5%; 25%; e 50% e 100% do vaso, correspondendo a 1; 2,5; 5; 10 e 20 cm de profundidade, além de um tratamento sem aplicação de calcário (Figura 2). Para os tratamentos com calcário incorporado nos respectivos volumes, foram colocadas redes para separar a fração de solo corrigido da fração não corrigida, com o intuito de facilitar a separação das amostras na hora da coleta.

Figura 2 - Esquema das profundidades de incorporação do calcário.



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

A semeadura foi realizada diretamente no solo, sem pré-germinação, nos três cultivos. Quando as plantas atingiram aproximadamente 10 cm de altura, foi realizado um desbaste, deixando-se quatro plantas por vasos nos cultivos de milho e oito plantas por vaso no cultivo de trigo. Para manter a umidade do solo e fornecer água às plantas, foi efetuada diariamente a pesagem dos vasos e a adição de água destilada para manter a umidade próxima a 80% da capacidade de campo. A retirada de plantas daninhas foi realizada quando emergidas. Para o controle de pragas e doenças foi utilizado o controle químico quando estas atingiram o nível crítico.

3.3.4 Amostragem e análises do tecido vegetal de plantas de milho e trigo

Completados os 60 dias de condução de cada cultivo, foi realizada a coleta da parte aérea das plantas (colmo + folhas). As plantas foram cortadas rente ao solo, armazenadas em sacos de papel, e secas em estufa com circulação forçada de ar, a 60 °C. Ao atingirem peso constante, realizou-se a pesagem para a determinação da matéria seca da parte aérea (MSPA). Para a determinação da composição química, o tecido vegetal foi moído em moinho tipo Wiley. Amostras de 0,2 g do tecido vegetal foram adicionadas em tubos de digestão de 50 mL, aos quais foram adicionados 2 mL de H₂O₂, 2 mL de H₂SO₄ concentrado e 0,7 g de mistura de digestão (100 g de Na₂SO₄ + 10 g de CuSO₄.5H₂O + 1 g de Se). A seguir foi efetuada a digestão em bloco aquecido a 350°C. No extrato da digestão foi determinado N por arraste de vapores em destilador Kjeldahl (TE-0364, TECNAL), P pelo complexo fosfomolibdato em espectrofotômetro de absorção molecular (UV-1800, SHIMADZU) a 882 nm (Murphy and Riley, 1962), K por espectrometria de emissão atômica (DM -62, DIGIMED), e Ca e Mg determinados em espectrofotometria de absorção atômica, conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). Concomitantemente foi coletado o sistema radicular, sendo as raízes separadas do solo por meio do uso de uma peneira de 2 mm, com o intuito de reduzir as perdas de raízes mais finas. A desagregação do solo para a separação das raízes foi realizada manualmente, sem o auxílio de água corrente o que acarretaria a quebra das raízes mais finas. Após a coleta, foram lavadas em água corrente para a retirada de partículas de solo e então acondicionadas em recipientes plásticos e conservadas em álcool 70% em câmara fria a uma temperatura de aproximadamente 7 °C, a fim de evitar a deterioração das

mesmas. Posteriormente, as raízes foram transferidas para a estufa de circulação forçada a 60 °C, até atingirem peso constante. Na sequência, determinou-se a matéria seca das raízes (MSR), e em seguida os atributos radiculares, usando o sistema de varredura Winrhizo Pro (2009) (Reagent Instruments Canada Inc.) com o scanner Epson Expression 10000 XL.

3.3.5 Análises químicas do solo

Findado os três cultivos, realizou-se a coleta das amostras de solo. O volume de solo de todo o vaso foi homogeneizado em bandejas plásticas de onde foram retiradas aproximadamente 150g de solo úmido, posteriormente seco em estufa a 65 °C. Na sequência, as amostras foram moídas e passadas em peneiras com diâmetro de 2,0 mm. Nelas, foi determinado o pH em água (relação 1:1) e os valores P e K foram extraídos com solução de Mehlich 3, Ca, Mg e Al trocáveis com solução de KCl 1 mol/L. Fósforo foi determinado por colorimetria, K por espectrofotometria de emissão, e Ca e Mg por espectrofotometria de absorção atômica; o Al trocável foi determinado por titulometria com NaOH 0,0125 mol/L. Foram ainda calculadas a acidez potencial (H+Al) (Equação 1), a saturação de bases da CTC (capacidade de troca de cátions) (V%) e saturação da CTC por Al (m%) de acordo com a metodologia descrita em CQFS-RS/SC (2016). Os valores de H+Al foram calculados de acordo com a equação estabelecida por Kaminski et al. (2001):

$$H+Al \text{ (cmolc/dm}^3\text{)} = [\exp (10,665 - 1,1483*SMP)] / 10$$

3.3.6 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro Wilk para atender os pressupostos da análise de variância (ANOVA). Quando significativos, realizou-se regressões para as doses de calcário e teste de Tukey ao nível de significância de 5% para camadas de incorporação a partir da superfície. As análises foram realizadas com auxílio dos programas estatísticos SISVAR 5.6, sendo a elaboração dos gráficos feita através do programa SigmaPlot 11.0.

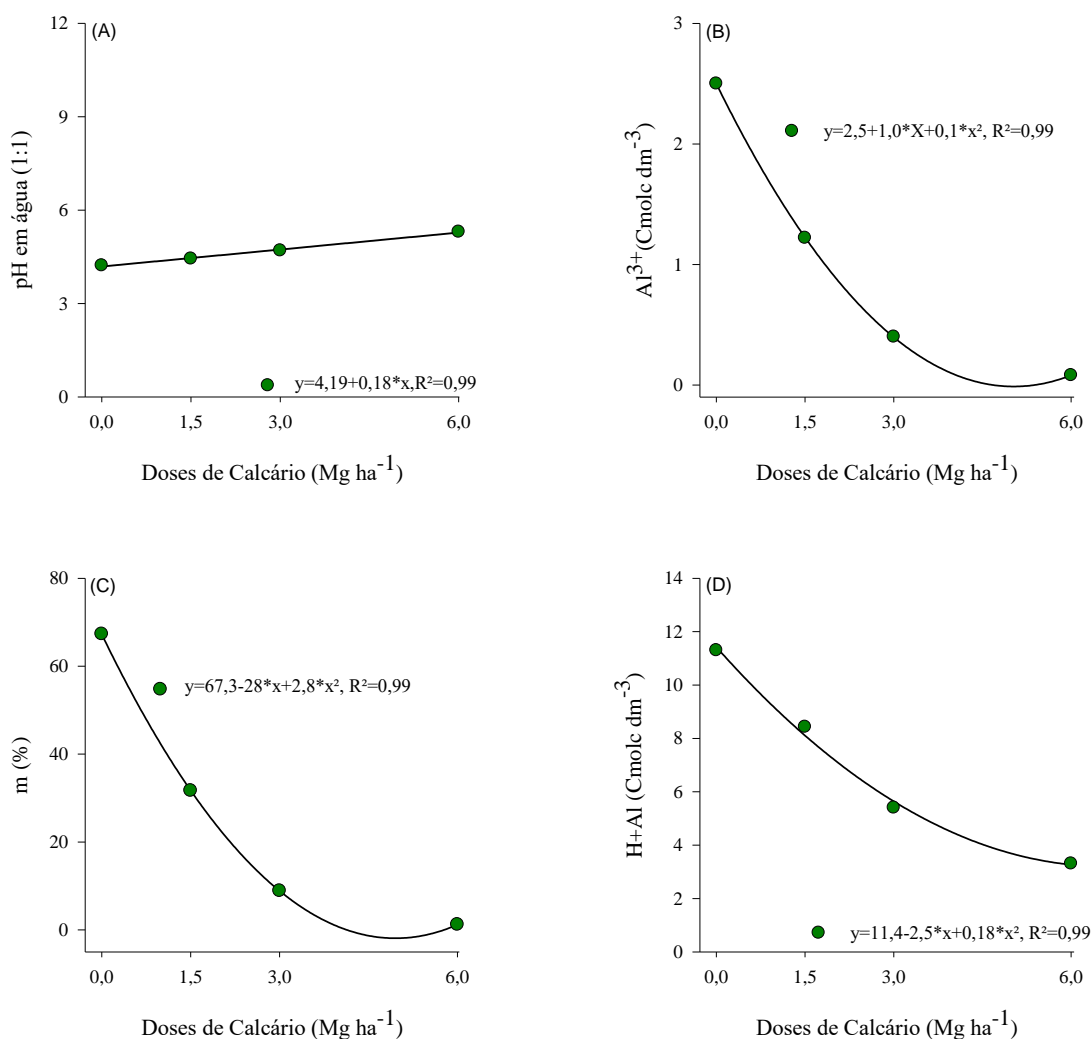
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.4.1 Experimento I - Doses de Calcário

3.4.1.1 Atributos químicos do solo

Os valores dos componentes da acidez do solo sofreram alterações após a aplicação de doses crescentes de calcário e dos cultivos sucessivos de milho e trigo (Figura 3). Como esperado, a calagem elevou linearmente o pH-H₂O do solo após os três ciclos de cultivo, sendo que o maior valor foi alcançado somente na maior dose aplicada. No entanto, o pH não atingiu os valores predeterminados pelo método SMP, pois no tratamento com a aplicação de 100% da dose recomendada o valor chegou a 5,3. Além disso, podemos destacar que houve redução de 1,08 unidades de pH no tratamento que não recebeu aplicação do corretivo, resultando no aumento da acidez em comparação à avaliação do pH que antecedeu o período de incubação. Essa queda no pH-H₂O do solo após os três ciclos de cultivo, em todos os tratamentos, pode estar relacionada com a aplicação da adubação nitrogenada na forma de ureia, a qual promove a acidificação do solo através do processo de nitrificação, sendo responsável pelo aumento de íons H⁺ na solução do solo após o término de todas as suas reações (Rosado et al., 2014; Caires et al., 2015). Além disso, o decréscimo no pH pode ter sido proporcionado pelo processo de reacidificação natural do solo, onde há liberação de íons H⁺ pelas raízes, provenientes da absorção de nutrientes catiônicos para a manutenção da eletronegatividade interna da planta, pela exportação de cátions básicos do solo com consequente redução dos seus teores no solo e a dissociação de grupos ácidos da matéria orgânica do solo (NATALE et al., 2012; BATISTA et al., 2018). Resultado semelhante foi obtido por Galindo et al. (2017), que ao aplicar doses de calcário dolomítico (0; 1,28; 2,5 e 5,1 Mg ha⁻¹) em Latossolo Vermelho distrófico constataram que houve pequeno decréscimo no pH do solo após 55 dias, tanto no tratamento sem aplicação quanto nas maiores doses aplicadas de 2,5 e 5,1 Mg ha⁻¹ do corretivo.

Figura 3 - Efeito da aplicação de doses de calcário nos componentes da acidez pH em água (A), alumínio trocável (B), saturação por alumínio (C) e acidez potencial (D) do Nitossolo Vermelho após três cultivos sucessivos de milho e trigo.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

A aplicação de doses crescentes de calcário influenciou de forma quadrática na redução da acidez trocável (Al³⁺), acidez potencial (H + Al) e saturação por alumínio (m%) do solo (Figura 3). Para os teores de Al³⁺, observou-se que houve variação entre 0,08 e 2,5 cmol_c dm⁻³ na maior dose e no tratamento sem aplicação do corretivo, respectivamente. À medida que aumentaram as doses de calcário, nota-se que houve redução no teor de Al³⁺ do solo. De acordo com CASTRO et al., (2015) e CUNHA et al., (2015), esses valores são possíveis devido à redução da atividade do Al³⁺ que está intimamente ligada ao pH-H₂O solo. Portanto, quando há adição de calcário ao solo, geralmente ocorre a elevação do pH-H₂O em função do aumento da concentração de

moléculas de hidroxilas (OH^-). Desta forma, quando o solo atinge valores de pH- H_2O próximos a 5,5, o Al^{3+} é precipitado na forma de $\text{Al}(\text{OH})_3$, e as formas tóxicas deixam de existir na solução do solo.

De acordo com Caires et al. (2003) e Flora et al. (2007) a ação do calcário na neutralização da acidez é dificultada devido ao aumento da retenção de cátions em decorrência da geração de cargas elétricas negativas com a elevação do pH do solo, o que pode explicar a não neutralização total do Al^{3+} na maior dose aplicada. Outro aspecto a ser considerado é que os ânions resultantes da dissolução do calcário, responsáveis pela neutralização da acidez, são também consumidos nas reações com outros cátions ácidos, tais como Fe^{2+} , Mn^{2+} e Al^{3+} (ERNANI et al., 2007; CUNHA et al., 2019).

Paralelamente ao pH, nota-se que após três cultivos sucessivos de milho e trigo os teores de $\text{H} + \text{Al}$ foram reduzidos exponencialmente com o aumento das doses de calcário, partindo de $11,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na ausência de calcário para $3,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ com aplicação da maior dose do corretivo (6 Mg ha^{-1}), gerando uma redução de $8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Esse resultado se assemelha com o obtido por Brignolli et al. (2020), que também constataram o decréscimo da $\text{H} + \text{Al}$ ao avaliarem o efeito de doses crescentes de calcário dolomítico nos atributos químicos de um Cambissolo Háplico. Contudo, a dose máxima não foi suficiente para reduzir o $\text{H} + \text{Al}$ para valores considerados ideais, isto é, de 1,0 a $2,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, indicando o elevado poder tampão desse solo.

Os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} aumentaram após a aplicação de doses crescentes de calcário ao solo, o qual apresentou baixos teores iniciais de ambos os nutrientes, conforme mostra a primeira análise de solo (Tabela 1). O Ca^{2+} aumentou seus teores de forma linear com as doses de calcário, os quais variaram de baixo a adequado (Figura 4). No entanto, pode-se observar (Figura 4), que as menores doses de calcário ($1,5$ e $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$) não proporcionaram o incremento de Ca^{2+} a níveis apropriados para o desenvolvimento das plantas cultivadas.

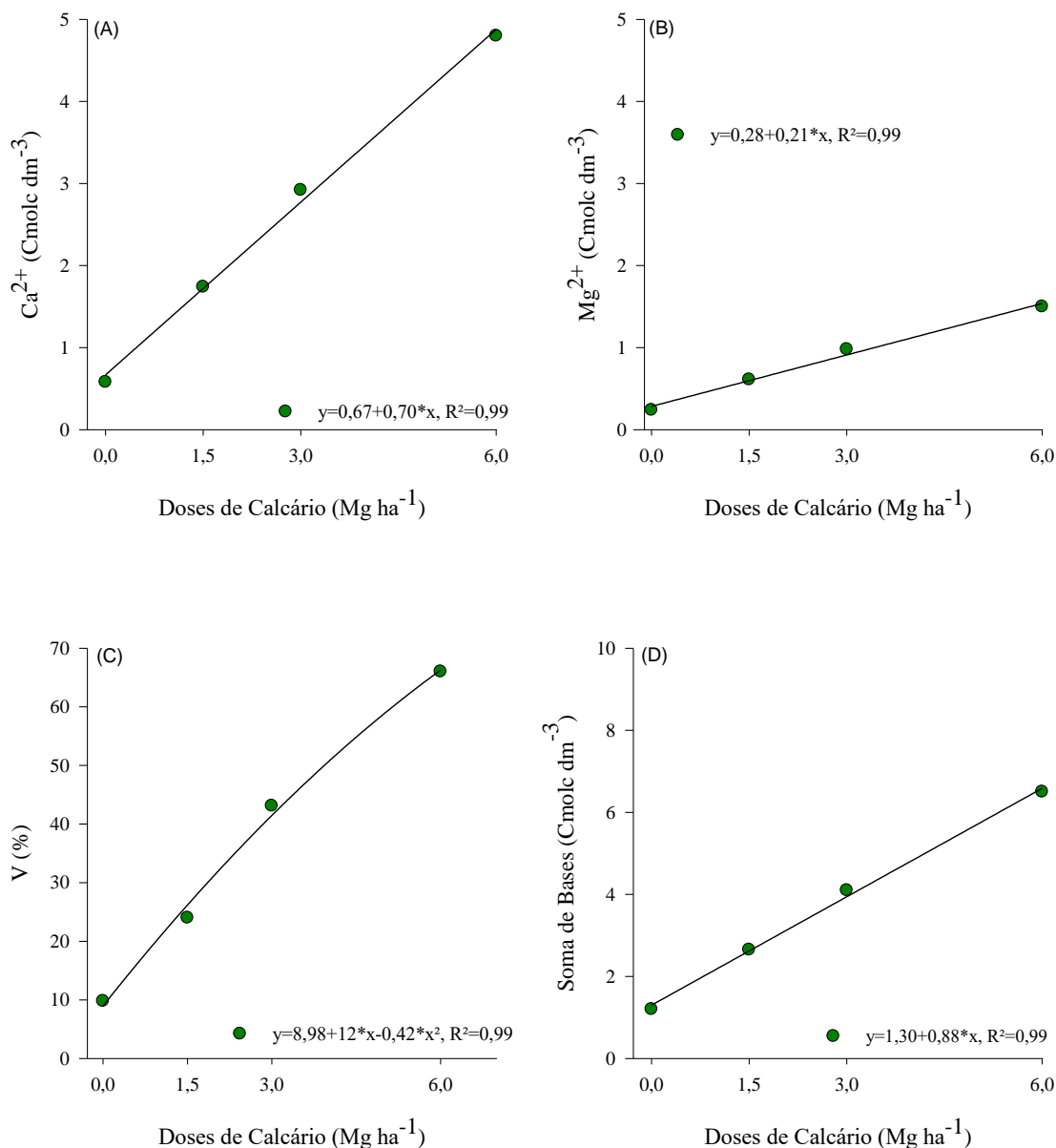
Desse modo, a máxima dose aplicada foi a única que propiciou o teor apropriado de Ca^{2+} no solo, chegando a $4,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, conforme interpretação do Manual de Adubação e Calagem para os Estados do RS e SC (CQFS-RS/SC, 2016). Os resultados obtidos corroboram os observados por Maraschin et al. (2020) que, após testarem aplicações de doses crescentes de calcário dolomítico nos atributos químicos de um Latossolo Vermelho distrófico, perceberam um aumento notável dos teores de Ca^{2+} no solo, sendo que somente a maior dose possibilitou o aumento dos teores do nutriente a níveis adequados para o desenvolvimento das plantas. Da mesma forma, em um trabalho

avaliando o efeito de doses de calcário na correção da acidez de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, Bambolim et al (2015) também verificaram aumento linear nos teores de Ca^{2+} nos tratamentos que receberam a aplicação do corretivo.

Esse incremento após a adição do calcário também foi observado nos teores de Mg^{2+} , o qual apresentou valores entre 0,24 e 1,5 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ no tratamento sem aplicação de calcário e naquele que recebeu a dose de 6 Mg ha^{-1} respectivamente, sendo que somente este apresentou valor considerado como satisfatório para o desenvolvimento agrônomo das culturas. Esses resultados se assemelham aos obtidos por Bossolani et al. (2021) que, ao estudarem a influência da calagem em diferentes doses nas propriedades químicas de um Latossolo Amarelo, constataram efeito crescente nos teores de Mg^{2+} do solo até a aplicação da maior dose testada. Além disso, outros trabalhos mostraram a eficiência do calcário no aumento dos teores de Mg provenientes da ação positiva da aplicação de doses de calcário dolomítico (MELO et al., 2019; BIAZATTI et al., 2020).

As alterações nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} e a redução da acidez do solo resultantes da adição de calcário refletiram de forma direta e positiva tanto na saturação por bases (V%) quanto na soma de bases (Figura 4). Dessa forma, nota-se que houve aumento da (V%), a qual variou de 9,6 %, na ausência do corretivo, para 66% na dose recomendada. Essa diferença expressiva é decorrente da aplicação de doses de calcário dolomítico, sendo que os maiores incrementos foram encontrados nas doses de 3,0 e 6,0 Mg ha^{-1} , variando de 43% a 66% respectivamente. A V% mínima a ser atingida deve ser maior ou igual a 65%, conforme preconizado pelo Manual de Adubação e Calagem para os Estados do RS e SC (CQFS-RS/SC, 2016). No entanto, esse valor foi observado somente no tratamento que recebeu a máxima dose do corretivo. Isso pode ser atribuído às características do calcário utilizado e aos os teores de CaO e MgO contidos nele.

Figura 4 - Valores de cálcio (A), magnésio (B), saturação por bases (V%) (C) e soma de bases (D) após a aplicação de doses de calcário em um Nitossolo Vermelho.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Além disso, outro fator capaz de influenciar esse resultado é o poder tampão do solo, que é maior em solos muito argilosos devido à presença de grandes quantidades de colóides. Por sua vez, esse tipo de solo é capaz de resistir a mudanças bruscas de pH e exige maiores doses de calcário para atingir os valores desejados de V% ou pH (RONQUIN, 2010). Essa tendência também foi observada em um estudo realizado por Maraschin et al. (2020), que ao testarem doses de calcário em dois Latossolos, um com 64% e outro com 27% de argila, perceberam que a maior V% alcançada foi no solo com menor poder de tamponamento.

Além do aumento da V% do solo, as doses de calcário dolomítico também contribuíram para o aumento da soma de bases, que variou de $1,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, no tratamento sem correção da acidez, para $6,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ no tratamento com a maior dose aplicada. Com a adição do calcário ocorre a neutralização parcial da acidez e como consequência o aumento dos teores de Ca e Mg, que foram proporcionais à quantidade de calcário aplicada. Dessa forma, a soma desses cátions básicos, dos quais boa parte são atraídos e armazenados nas cargas negativas que compõe a CTC, acabam implicando no incremento da soma de bases do solo. Estes resultados estão de acordo com Vanda-Sebastião et al. (2019) que, ao estudarem as doses ideais de calcário para a correção da acidez, relataram que as modificações químicas proporcionadas pela calagem foram responsáveis pelo incremento nos teores de cátions básicos e consequentemente no aumento da soma de bases.

Apesar de apresentar resultados satisfatórios na neutralização da acidez, a aplicação de doses de calcário não causou alterações nos teores de N (Tabela 2). No entanto, após os três ciclos de cultivo, os teores de P no solo aumentaram em função da adição das doses de calcário e também em virtude da presença de íons de P provenientes da adubação fosfatada, variando de $1,85 \text{ mg dm}^{-3}$, no tratamento sem correção da acidez, para $3,91 \text{ mg dm}^{-3}$ no tratamento com a dose recomendada (Tabela 2). No geral, os valores determinados ficaram abaixo do nível crítico recomendado pelo Manual de Adubação e Calagem para os Estados do RS e SC (CQFS-RS/SC, 2016) para essa classe de solo. Em um estudo com o objetivo de avaliar os efeitos da calagem a longo prazo sobre a fertilidade do solo, Da Costa et al. (2016) também observaram que as doses do corretivo contribuíram para o aumento linear dos teores de P disponível às plantas. Segundo os autores, esse incremento pode ser atribuído à redução da adsorção de P, devido ao aumento do pH e ao consequente aumento da solubilidade dos fosfatos de ferro e alumínio.

Tabela 2 - Teores de nitrogênio, fósforo e potássio do solo após cultivos sucessivos de milho e trigo e aplicação de doses de calcário em um Nitossolo Vermelho.

Nutriente (g kg ⁻¹)	Dose de calcário (Mg ha ⁻¹)				Equação	R ²
	0	0.25	0.5	1.0		
N	2.78	3.14	2.80	2.66	ns	-
P	1,85	2,51	2,56	3,91	y= 1,84+0,32*x	0,94
K	152.5	115.5	76,30	65,00	y=154,5-34,5*x+3,23*x ²	0,98

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

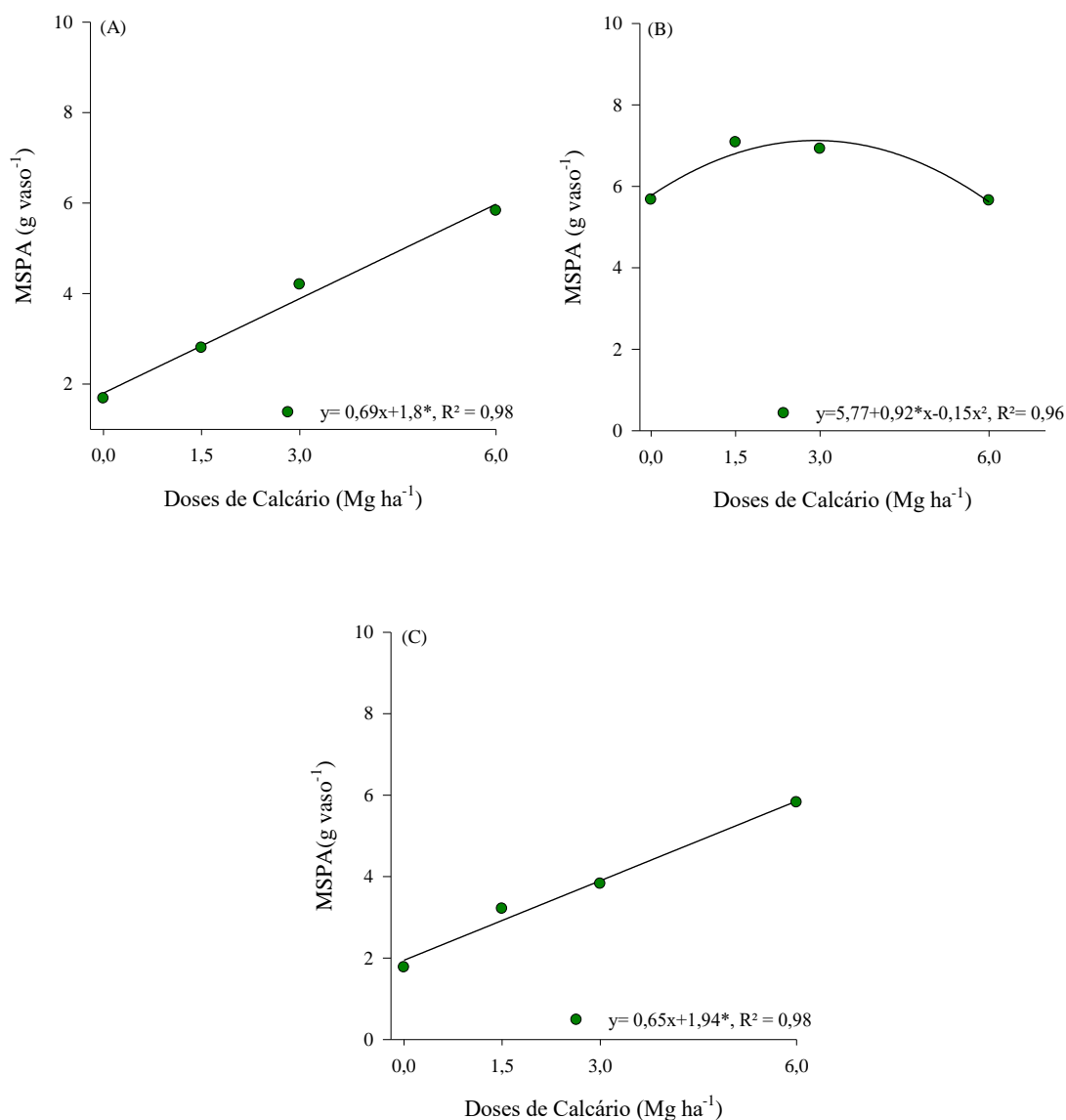
Contudo, a disponibilidade de K⁺ foi reduzida linearmente em função do aumento das doses de calcário, os quais variaram de 152 mg kg⁻¹, no tratamento sem a adição do corretivo, para 65 mg kg⁻¹, na maior dose aplicada (recomendada pelo SMP para elevar o pH até 6,0). Em estudos anteriores Pavinato; Rosalem, (2008) e Nolla et al. (2020) concluíram que a adição de calcário promove o aumento dos teores de Ca²⁺ e Mg²⁺, podendo causar a redução na capacidade do K em ser adsorvido nos sítios de troca do solo, decorrente da sua menor valência em relação ao Ca²⁺ e Mg²⁺. Além disso, os resultados podem estar atrelados a maior capacidade de exploração das raízes das plantas cultivadas nos tratamentos que receberam doses de calcário, e também à falta de reposição da adubação potássica nos ciclos de cultivo seguintes.

3.4.1.2 *Matéria seca da parte aérea e teores de nutrientes no milho e no trigo*

Devido aos benefícios proporcionados pela aplicação do corretivo da acidez ao solo, como o aumento de pH e redução do Al³⁺, observou-se que a produção de MSPA, tanto de milho quanto de trigo, aumentaram com o aumento das doses de calcário (Anexo A). No primeiro e no terceiro cultivo, o incremento foi linear, tendo variado de 1,68 a 5,83 g vaso⁻¹ e de 1,77 a 5,82 g vaso⁻¹ respectivamente. Dessa forma, observa-se que para cada tonelada de calcário aplicada ocorreram incrementos de 0,69 e 0,65 gramas por vaso nos tratamentos com a maior dose do corretivo. Entretanto, o segundo cultivo de milho foi o único que apresentou incremento com resposta quadrática em função da adição das doses de calcário, sendo que o maior acréscimo foi encontrado logo na dose de 1,5 Mg

ha⁻¹, onde o pH chegou a 5,2 logo após a incubação. Desse modo, observa-se que não houve resposta das plantas de milho no tratamento com a adição da dose recomendada pelo SMP para elevar o pH até 6,0. Pressupõe-se que este resultado esteja ligado, pelo menos em parte, à alta dose utilizada na adubação de manutenção do P que foi realizada no segundo cultivo. Segundo Ernani et al. (2001), a inexistência ou a baixa resposta à calagem tem sido verificada em outras espécies, principalmente em solos com altos teores de argila. Além disso, a adição de grandes quantidades de fertilizantes fosfatados também pode interferir na resposta das culturas à calagem (Ernani et al., 2000).

Figura 5 - Produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) das plantas de milho (A) e (B) e trigo (C), cultivadas em casa de vegetação após aplicação de doses de calcário em um Nitossolo Vermelho.



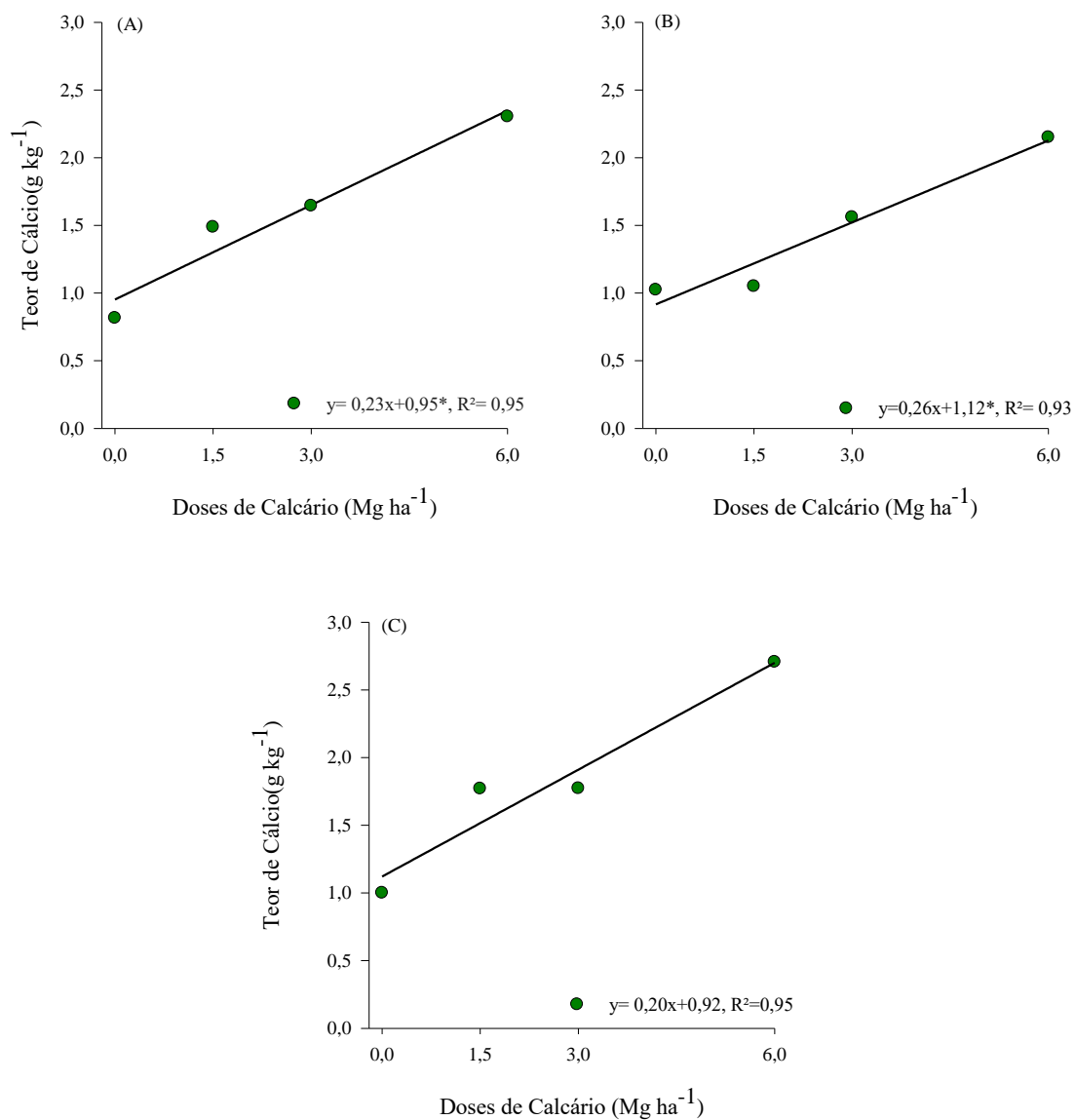
Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Portanto, presume-se que em solos ácidos e altamente tamponados, assim como muitos dos solos encontrados em Santa Catarina, não há necessidade de aplicar altas doses de calcário, uma vez que pode ocorrer baixa ou nenhuma resposta das plantas à calagem em condições ambientais e nutricionais adequadas. Por este motivo, Almeida et al. (1999) propuseram como uma alternativa elevar para 5,2 o pH desses solos. Segundo os autores, por falta de recursos financeiros, muitos produtores acabam não utilizando o calcário ou aplicam doses em quantidades muito inferiores daquelas recomendadas, o que acaba limitando a produção agrícola. Em termos práticos, elevar o pH para 5,2 e mantendo a produtividade em níveis satisfatórios, seria economicamente vantajoso, já que para elevar o pH dos solos para 5,5 torna-se inviável para agricultores familiares devido ao alto custo, especialmente no início do processo produtivo (CUNHA et al., 2019).

Os teores de macronutrientes nas folhas e colmos nos tecidos vegetais de milho e trigo foram influenciados pela aplicação de doses crescentes de calcário (Figura 6). Os teores de Ca e Mg aumentaram linearmente com o aumento das doses de calcário, nos três cultivos. Na maior dose aplicada, as concentrações de Ca na parte aérea atingiram 2,3; 2,7 e 2,2 g kg⁻¹ nos três cultivos, respectivamente. Os teores de Ca considerados como ideais no tecido vegetal do milho são de 2,3 a 8,0 g kg⁻¹. Portanto, os valores encontrados nos cultivos dois ciclos de cultivo de milho estão dentro dos parâmetros considerados como satisfatórios para a cultura; já para o trigo, os teores de Ca ideias variam de 2,5 a 10 g kg⁻¹ e, portanto, o teor encontrado no cultivo de trigo ficou abaixo daquele que é considerado como ideal para a cultura.

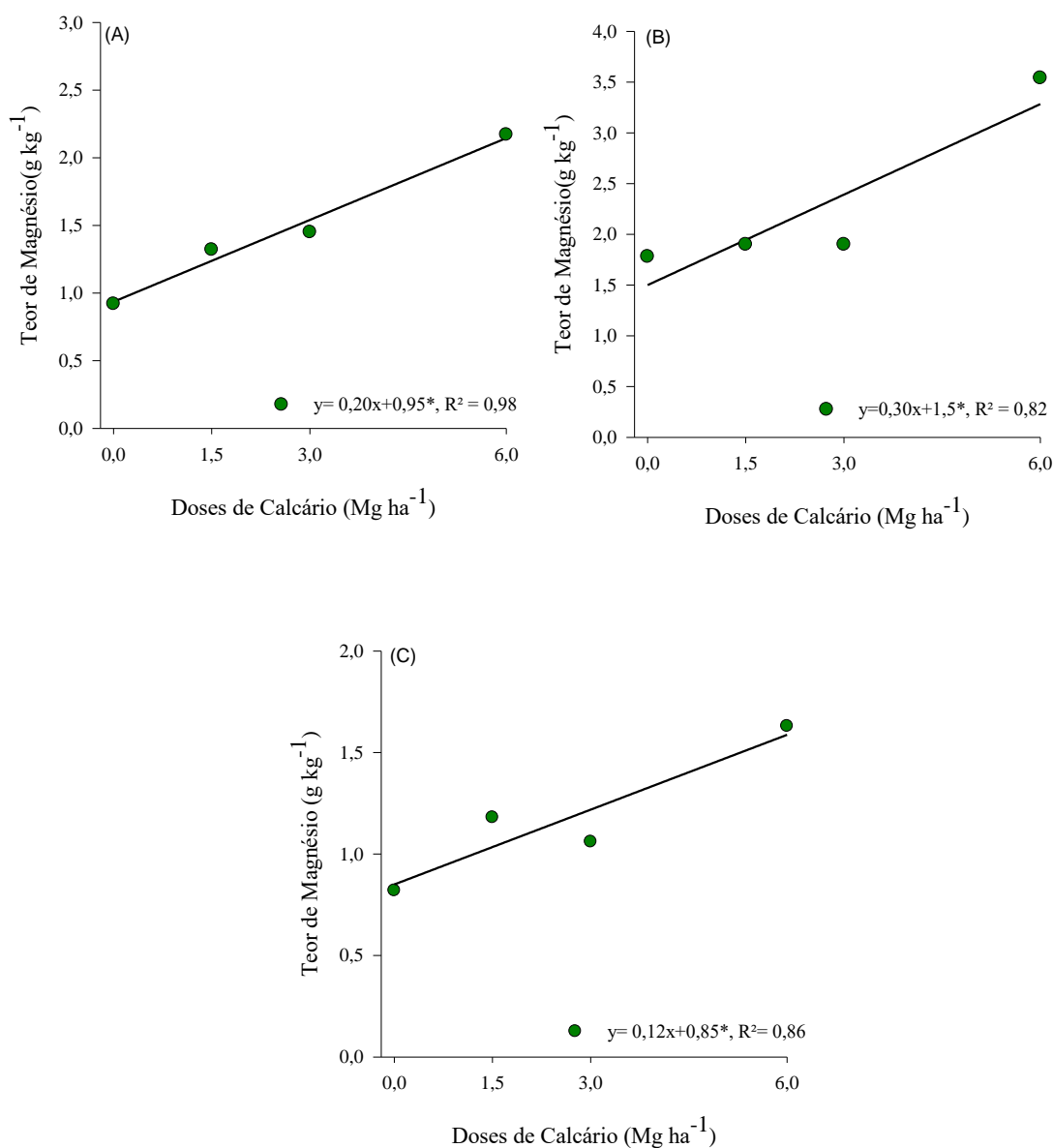
Esses incrementos também foram observados nas concentrações de Mg da parte aérea dos três cultivos, sendo que na maior dose os teores encontrados foram de 2,1 g kg⁻¹ no primeiro cultivo, 3,5 g kg⁻¹ no segundo cultivo, e 1,6 g kg⁻¹ no terceiro cultivo. (Figura 7). Os teores ideias de Mg no tecido vegetal de milho variam de 1,5 a 5,0 g kg⁻¹ e para a cultura do trigo esses teores variam de 1,5 a 4,0 g kg⁻¹. Deste modo, os teores de Mg encontrados nos três cultivos estão dentro dos níveis considerados normais para as culturas avaliadas. Segundo Rodrighero et al. (2015) e Castro; Crusciol (2013), tais resultados eram esperados, pois além dos efeitos indiretos do pH na disponibilidade de Ca e Mg, a calagem é conhecida por influenciar de forma positiva na absorção de Ca e Mg nas culturas, visto que os produtos originados na dissociação do calcário elevam a disponibilidade de Ca e Mg trocáveis no solo devido aos teores de CaO e MgO presentes na sua composição.

Figura 6 - Teores de cálcio nos tecidos vegetais das plantas de milho (A) e (B) e trigo (C) cultivadas em casa de vegetação após aplicação de doses de calcário em um Nitossolo Vermelho.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Figura 7 - Teores de magnésio nos tecidos vegetais das plantas de milho (A) e (B) e trigo (C) cultivadas em casa de vegetação após aplicação de doses de calcário em um Nitossolo Vermelho.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

O Ca desempenha um papel de grande importância no funcionamento das plantas, pois faz parte de várias estruturas vegetais, incluindo as paredes celulares. Além disso, atua como ativador de enzimas em reações fotossintéticas, nas funções reprodutivas e nas raízes das plantas. Do mesmo modo, o Mg também apresenta um papel de suma importância para o desenvolvimento e crescimento das plantas. Entre as suas principais funções, está a ativação de enzimas em diversos processos fisiológicos vegetais, além de ser o principal constituinte da molécula de clorofila (PES; ARENHARDT, 2015).

Com relação aos teores de P da parte aérea das plantas de milho e trigo, nota-se que houve resposta linear decrescente para os três ciclos de cultivo em virtude da aplicação

de doses de calcário (Tabela 3). A redução dos teores de P com o aumento das doses do corretivo pode ser atribuída ao efeito de diluição desse elemento na planta com o incremento na MS. Esse efeito ocorre quando a produção de matéria seca é superior à taxa de absorção relativa do nutriente (MAIA et al., 2005); (SILVA et al., 2014). Resultados semelhantes foram encontrados por Gomes et al. (2002) que, ao testarem doses de calcário na produção de matéria seca e na composição mineral de duas cultivares de alfafa, observaram diminuição dos teores de P com a elevação das doses de calcário. De modo geral, os teores de P da parte aérea encontraram-se na faixa de 0,93 a 1,70 g kg⁻¹ nos dois ciclos de cultivo de milho, os quais se encontram abaixo de 2,1 a 3,3 g kg⁻¹, que são os níveis considerados normais para a cultura. Contudo, no terceiro cultivo (trigo) os teores de P variaram de 3,01 a 2,11 g kg⁻¹, no tratamento sem aplicação do corretivo e na dose máxima de calcário respectivamente, sendo classificados como satisfatórios para o desenvolvimento das culturas.

Tabela 3 - Teores de nitrogênio, fósforo e potássio nos tecidos vegetais das plantas de milho e trigo cultivadas em casa de vegetação após aplicação de doses de calcário em um Nitossolo Vermelho.

Cultivo Nutriente	Dose de calcário (Mg ha ⁻¹)				Equação	R ²	
	0	0.25	0.5	1.0			
Milho	N	29.78	33.41	25.51	19.65	y=32,4-2,02*x	0,77
	P	3.96	2.97	1.89	0.94	y=3,76-3,02*x	0,97
	K	30.85	39.06	32.96	34.57	ns	-
Milho	N	15,10	15,84	19,30	18,60	ns	-
	P	3.01	2.06	2.09	2.11	y=1,73-0,72*x	0,92
	K	32.26	31.18	24.52	25.66	y=28,0+8,5*x	0,64
Trigo	N	28,20	24,40	21,10	21,40	y=28,3-3,5*x+0,38*x ²	0,99
	P	1.70	1.67	1.28	1.04	ns	-
	K	26.52	34.48	31.03	36.88	y=31,6-7,2*x	0,65

Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

As doses de calcário afetaram os teores de K dos tecidos de plantas de milho e trigo, no segundo e no terceiro cultivo (Figura). Para o segundo cultivo (milho), o K aumentou linearmente com o aumento da dose de calcário, onde os teores variaram de 26,52 a 36,88 g kg⁻¹ no tratamento sem calcário e na maior dose, respectivamente. Já para o cultivo de trigo, a resposta foi linear decrescente, mostrando que houve redução nos

teores de K com o aumento das doses, variando de 32,2 a 25,7 g kg⁻¹ no tratamento sem aplicação e na dose recomendada, respectivamente. É provável que essa redução de K nos tecidos das plantas de trigo esteja relacionada com o aumento na disponibilidade de Ca⁺² e Mg⁺² pela aplicação das doses de calcário (CARVALHO; NASCENTE, 2014), causando um desequilíbrio na relação entre Ca⁺², Mg⁺² e K⁺, o que acabou prejudicando a absorção de K (SCHENFERT et al. 2020), além da diminuição da concentração de K na solução do solo decorrente do aumento das cargas negativas ocasionadas pelo aumento do pH. De acordo com Pavinato et al. (2017), a faixa de teores consideradas adequadas para K no trigo varia de 15 a 30 g kg⁻¹, indicando que os teores de K encontrados no presente estudo estão dentro dos parâmetros adequados para a cultura.

Os resultados para a concentração de N na parte aérea de milho mostram que o aumento das doses de calcário provocou decréscimo linear para o primeiro cultivo e quadrático para o terceiro cultivo, variando de 29,8 a 19,6 no milho e de 28,2 a 21,4 g kg⁻¹ no trigo, na testemunha e na maior dose, respectivamente. Portanto, os teores de N dos tecidos vegetais das culturas podem ser considerados como satisfatórios, com exceção da maior dose de calcário no primeiro cultivo de milho. Como não houve redução na disponibilidade de N no solo após a aplicação do calcário, isso pode ser explicado pelo efeito de diluição (ARANTES et al., 2022). No tratamento sem calcário, as plantas apresentaram menor crescimento, resultando em maior concentração do nutriente prontamente disponível no solo. Resultados semelhantes foram encontrados por Cunha et al. (2019), que ao testarem doses crescentes de calcário dolomítico, observaram que houve redução dos teores de N na cultura do milho em função do aumento das doses do corretivo em relação a testemunha que não recebeu aplicação.

3.4.1.3 Matéria seca e atributos radiculares das plantas de milho e trigo

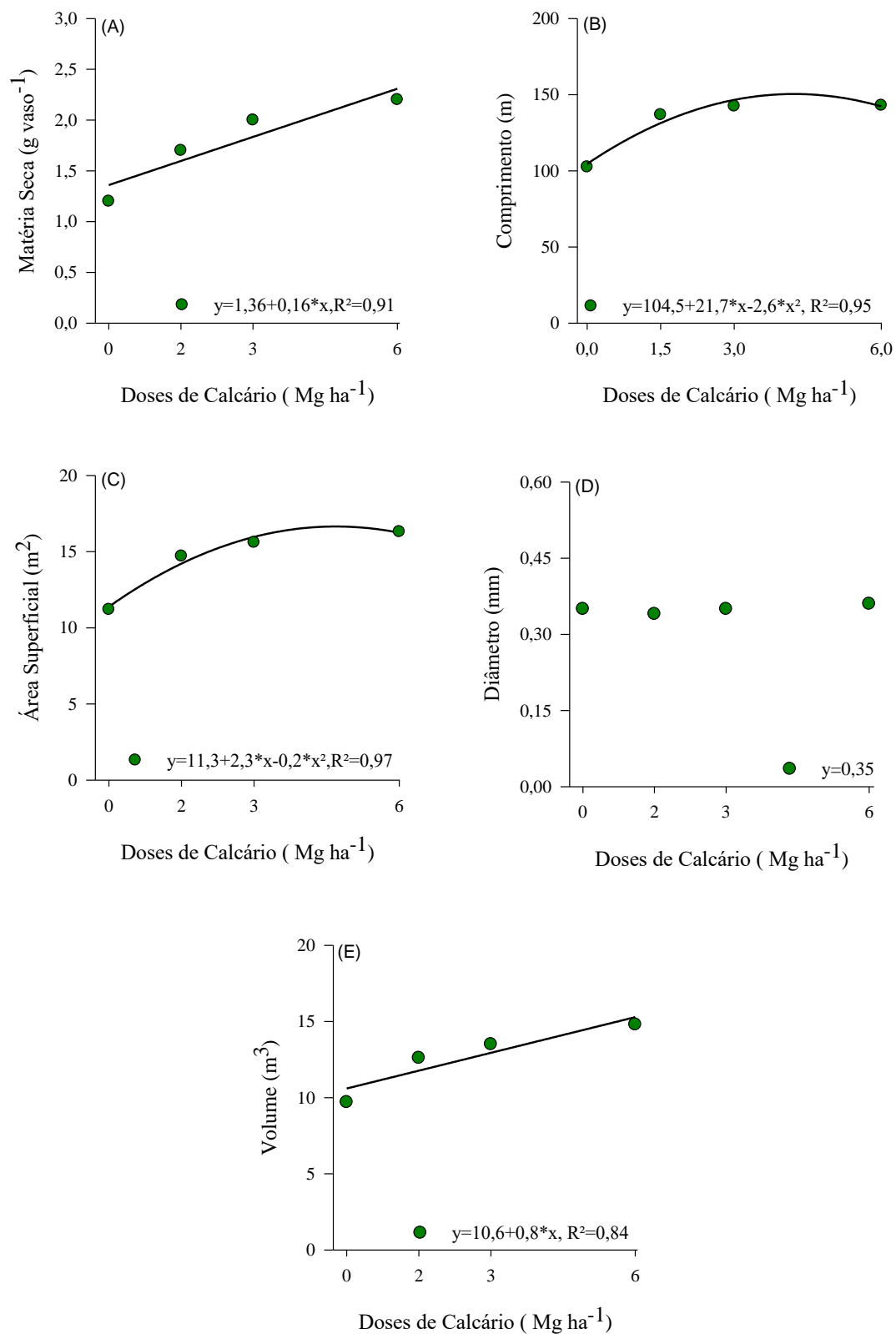
Como estratégia para aumentar a aquisição de nutrientes, principalmente de P, as plantas tendem a ter maior relação entre a massa de matéria seca da raiz e da parte aérea, assim como maior comprimento de raízes, além de raízes mais finas, obtendo assim maior área superficial do sistema radicular (TINOCO et al., 2014). Dessa forma, observa-se que as doses de calcário apresentaram alta correlação com todas as variáveis radiculares avaliadas no cultivo de trigo, com exceção do diâmetro de raiz (Figura 8). De modo geral, observa-se que a MSR do trigo apresentou ajuste linear crescente em função do aumento

das doses do corretivo, variando de 1,17 g vaso⁻¹ no tratamento que não recebeu calcário para 2,23 g vaso⁻¹ na dose recomendada pelo SMP para elevar o pH até 6,0. Esse aumento da MSR pode estar relacionado com o comprimento radicular, pois, com o desenvolvimento das raízes, ocorre aumento da superfície de contato e exploração de maior volume de solo. Dessa forma, é provável que ocorreu incremento na absorção de água e nutrientes (SILVA et al., 2013; ZANDONÁ et al., 2015).

O comprimento do sistema radicular do trigo apresentou resposta positiva e comportamento quadrático com o aumento da dose do corretivo da acidez. O aumento do comprimento do sistema radicular proporcionado pela adição do calcário está diretamente relacionado ao incremento dos teores de Ca e Mg ao solo, uma vez que estes elementos participam da síntese da parede celular do sistema radicular (SILVA et al., 2007; SILVA et al. 2013), e principalmente com a diminuição do Al. Outros autores também verificaram que a calagem proporciona efeitos benéficos no comprimento radicular de várias espécies, incluindo arroz (CRUSCIOL et al., 2012), milho (CASTRO et al., 2013), e alfafa (TANAMATI et al., 2013).

A área superficial radicular das plantas de trigo apresentou o mesmo comportamento do comprimento radicular em função da aplicação das doses crescentes de calcário. O menor valor encontrado foi de 11,2 m³ no tratamento sem adição de calcário. Já para o tratamento com aplicação da metade da dose (3 t ha⁻¹), a área superficial radicular foi de 15,6 m³ e o maior incremento foi de 16,3 m³ na máxima dose aplicada. Desse modo, observa-se que houve ligeira resposta no tratamento com a adição da dose recomendada pelo SMP para elevar o pH até 6,0, mostrando um incremento de apenas 4,5% em relação a dose de 3 t ha⁻¹. Segundo Cunha et al. (2019), os baixos teores de alumínio tóxico encontrados acabam não interferindo na absorção e transporte de nutrientes pelas plantas e, portanto, não haveria necessidade da aplicação de doses muito altas para inativá-lo, uma vez não teria retorno na produtividade das culturas.

Figura 8 - Produção de matéria seca de raiz (A), comprimento do sistema radicular (B), área superficial (C), Diâmetro (D) e volume (E) de plantas de trigo cultivadas em casa de vegetação após aplicação de doses de calcário em um Nitossolo Vermelho.



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Quanto ao volume radicular, nota-se que houve incremento com comportamento linear em virtude da adição das doses de calcário, sendo que seu máximo valor foi alcançado no tratamento com a aplicação da dose de 6 t ha⁻¹, com um aumento de aproximadamente 53% em relação ao tratamento sem calagem. De acordo com Silva et al. (2004), este aumento de volume radicular está relacionado ao incremento do comprimento e da área superficial radicular. Desse modo, o maior crescimento em profundidade aliado a melhor distribuição do sistema radicular propicia maior exploração de volume de solo, tendo como benefícios, maior absorção de água e nutrientes, tanto os de maior mobilidade como o nitrogênio, quanto os de menor mobilidade, como o fósforo (PUPATTO et al., 2004).

3.4.2 Experimento II – Profundidades de Incorporação do Calcário

3.4.2.1 Atributos químicos do solo

A aplicação de calcário incorporado nas diferentes camadas de solo aumentou o pH em relação ao tratamento sem calagem (Tabela 4). Como todos os tratamentos, à exceção da testemunha (sem calcário) o pH foi muito similar, ao redor de 5,1. Esses aumentos de pH em camadas de solo abaixo dos locais de adição do corretivo já foram verificados em vários estudos (PÁDUA et al., 2006; CAIRES et al., 2013). De acordo com Joris et al. (2013), a dissolução do calcário em solos ácidos promove a liberação de ânions OH⁻ e HCO₃⁻, os quais reagem com os cátions de reações ácidas da solução do solo (H⁺, Al³⁺, Fe²⁺, Mn²⁺) onde juntamente com cátions básicos se move em direção a camadas mais profundas do solo para neutralizar a acidez. Entretanto, de acordo com Rheinheimer et al. (2000) os efeitos da calagem só ocorreram em profundidade após o pH da zona de dissolução do calcário ter atingido valores de 5,2 a 5,5, pois enquanto existirem cátions ácidos a reação de neutralização da acidez estará limitada à camada superficial, retardando o efeito no subsolo.

Resultados semelhantes foram relatados por Meinhardt et al. (2020), onde testando os efeitos de diversos corretivos da acidez nas propriedades químicas do solo, observaram efeitos positivos do calcário na correção da acidez em profundidade, evidenciando os efeitos da frente de alcalinização no perfil do solo.

Tabela 4 - Atributos químicos do solo nas camadas corrigidas com calcário e nas camadas subsequentes de um Nitossolo Vermelho distroférico.

Camadas de Incorporação (cm)	Camada com Calcário							
	pH	Al	Ca	Mg	H+Al	SB	V	m
	-----cmol _c dm ⁻³ -----						-----%-----	
	--							
0	4,2c	2,50b	0,60d	0,23b	11,30b	1,20c	9,8d	67,30b
1	5,0b	0,04a	4,00c	1,26a	9,87b	5,40b	35,4c	0,70a
2,5	5,0b	0,04a	4,01c	1,30a	3,50a	5,41b	61,0b	0,78a
5,0	4,9b	0,05a	4,32bc	1,20a	3,70a	5,56b	60,0b	0,93a
10,0	5,1b	0,03a	4,73ab	1,45a	3,73a	6,26a	63,0ab	0,56a
20,0	5,3a	0,08a	4,8a	1,50a	3,31a	6,50a	66,0a	1,20a
	Camada abaixo da calcariada							
0	4,1b	2,48b	0,58c	0,23	11,28	1,20b	9,7	67,30
1,0	4,2ab	2,10a	0,70abc	0,30	10,89	1,34ab	11,0	61,00
2,5	4,3a	2,02a	0,74ab	0,32	11,10	1,48a	11,8	57,80
5,0	4,3a	2,10a	0,65bc	0,30	9,87	1,35ab	12,1	61,00
10,0	4,2ab	2,10a	0,80a	0,30	11,62	1,53a	12,0	57,88

Médias seguidas de letras distintas na coluna apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5%. Fonte: Elaborada pela autora, (2022).

Em relação ao efeito da calagem nos teores de Al^{3+} , verificou-se que o mesmo foi neutralizado nas camadas de solo que receberam incorporação de calcário; na camada de solo sem calcário o Al foi de 2,5 $cmol_c dm^{-3}$. Segundo Vargas et al. (2019), a incorporação promove a mistura do calcário com todo o volume de solo revolvido, resultando em uma reação mais rápida devido ao melhor contato entre o calcário e as partículas de solo. Já o Al^{3+} das frações sem calcário não foi totalmente neutralizado, mas observa-se que a calagem proporcionou uma redução significativa em relação ao tratamento controle, variando de 2,02 $cmol_c dm^{-3}$ na camada que não recebeu calcário no tratamento que teve a camada corrigida com 2,5 cm de solo a 2,48 $cmol_c dm^{-3}$ no tratamento sem calcário. No entanto, essa redução foi insuficiente para transformar o solo em um ambiente adequado para crescimento e desenvolvimento das culturas de grãos. Novamente não se sabe se este efeito em profundidade foi devido à mobilização de calcário ou a problemas na coleta das amostras de solo Caires et al. (2011) verificaram que a adição de calcário foi efetiva na redução do Al^{3+} ao longo do perfil de solo, principalmente quando o corretivo foi

incorporado ao solo. De acordo com Zambrosi e tal. (2007); Melo et al. (2019), esse comportamento nos teores de Al^{3+} está fortemente ligado ao comportamento do pH, ou seja, o uso do calcário geralmente promove o aumento do pH devido à liberação de moléculas de OH^- na solução do solo, que por sua vez reduzem os teores de Al^{3+} devido a sua precipitação na forma de $\text{Al}(\text{OH})_3$.

Os maiores valores de acidez potencial ($\text{H} + \text{Al}$) variaram de 11,30 cmolc dm^{-3} no tratamento sem calagem para 9,87 cmolc dm^{-3} no tratamento com incorporação do corretivo até 1 cm de profundidade (Tabela 4). Em comparação ao tratamento controle, os maiores efeitos sobre a $\text{H} + \text{Al}$, foram observados quando o calcário foi incorporado nas camadas de 0 a 2,5; 0 a 5; 0 a 10 e 0 a 20 cm. No entanto, essa redução ficou limitada apenas para as camadas que receberam a adição do corretivo. Em um estudo com o objetivo de avaliar os atributos químicos do solo em função da calagem superficial e incorporada, Tiritan et al. (2016) também observaram que houve efeito da calagem na redução dos valores de $\text{H} + \text{Al}$. Os autores relacionam esse resultado ao aumento do pH, que estimula a alteração dos teores de Al^{3+} para formas não tóxicas para as plantas. Ainda de acordo com os autores, esse efeito de redução no Al^{3+} pode explicar a redução na $\text{H} + \text{Al}$ do solo. Essa diferença provavelmente está relacionada às variações no pH do solo, conforme já descrito por Kaminski et al. (2002).

As alterações nos teores de $\text{H} + \text{Al}$ do solo foram refletidas na m (%) que de modo geral foi baixa, chegando a 0,70% onde houve incorporação de calcário, e, portanto, praticamente nula. Quando não foi aplicado o corretivo da acidez, a saturação por alumínio chegou a 67,3%, caracterizando um ambiente inadequado para o crescimento de culturas como milho e trigo, que geralmente não toleram $m\%$ acima de 20% (CQFS-RS/SC, 2016). A $m\%$ representa a proporção de alumínio solúvel em relação aos teores de bases trocáveis e alumínio no CTC do solo (TEIXEIRA et al., 2017). Com a redução de m (%) ocorre a substituição de alumínio por bases trocáveis na CTC, o que torna o solo um ambiente favorável para o desenvolvimento e crescimento de raízes das culturas de interesse agrônomo (BLUM et al., 2020). Nas camadas corrigidas, o efeito na redução da saturação por alumínio além do local de aplicação do calcário não foi significativo, chegando a uma média de 57,8%.

O calcário propiciou aumento nos teores de Ca da camada na qual ele foi incorporado, sendo que os maiores teores encontrados foram, em média de 4,7 cmolc dm^{-3} , sendo considerados altos de acordo com a interpretação do Manual de Adubação e Calagem para os Estados do RS e SC (CQFS-RS/SC, 2016). Os teores de Ca das camadas

de solo abaixo do local de aplicação não atingiram valores considerados adequados para o crescimento e desenvolvimento das plantas de milho e trigo, provavelmente devido à baixa solubilidade do calcário. Contudo, observa-se que ocorreu uma ligeira movimentação de Ca além da camada de aplicação, onde os níveis se mantiveram próximos aos encontrados na caracterização do solo, quando comparados ao tratamento que não recebeu o corretivo. Segundo Rheinheimer et al. (2018), a correção do solo em subsuperfície pode ocorrer através dos canais formados por bioporos, originários das raízes mortas, permitindo assim a percolação da água contendo partículas finas de calcário em suspensão. No entanto, esse movimento do calcário em profundidade depende do tempo, dose, frequência da calagem, granulometria, poder tampão do solo e método de aplicação do corretivo, bem como de características do solo, condições climáticas e sistema de cultivo (CORREËA et al., 2004; BORTOLUZZI et al., 2014; CAIRES et al., 2015).

Os teores de Mg no solo apresentaram incremento em todas as camadas com a incorporação de calcário em relação ao tratamento controle, porém não houve diferença entre os tratamentos com adição do corretivo da acidez (Tabela 4). Além disso, os teores observados são altos, conforme preconizado pelo Manual de Adubação e Calagem para os Estados do RS e SC (CQFS-RS/SC, 2016), propiciando condições ótimas para o desenvolvimento das culturas de interesse econômico. No entanto, não se verificou acréscimo de Mg nas camadas de solo subsequentes às profundidades de incorporação. Este resultado pode ser compreendido pela fonte utilizada ser calcário dolomítico, o qual possui maior quantidade de CaO e menor de MgO (COLDELLA et al., 2018).

Em relação a V%, percebe-se que calcário aplicado proporcionou aumentos para esse atributo em todas as camadas de incorporação. De acordo com Castro; Crusciol (2013), os efeitos proporcionados pela correção do solo nos teores de H⁺, Al, Ca e Mg são refletidos na V% do solo. Além disso, nota-se que houve aumentos proporcionais entre pH e a V% do solo nas camadas com a incorporação do corretivo, ou seja, quando se eleva o pH, conseqüentemente ocorre também a elevação da V% no solo.

Quando comparado ao tratamento controle, o tratamento com incorporação até a na camada de até 1 cm promoveu acréscimo, e a saturação por bases chegou a 35%, e nos tratamentos com incorporação do corretivo nas camadas de 0 a 2,5; 0 a 5 e 0 a 10 cm a saturação por bases ficou em torno de 61%. Manual de Adubação e Calagem para os Estados do RS e SC (CQFS-RS/SC, 2016), a saturação por bases mínima deve ser maior

ou igual a 65%, entretanto, esse valor foi alcançado somente quando o calcário foi incorporado na camada de até 20 cm. Em um estudo avaliando a aplicação de calcário incorporado nas profundidades de 0 a 10 e 0 a 20 cm na correção da acidez em um Latossolo Vermelho distroférico Pádua et al. (2006) também verificaram que houve aumento nos níveis de V% quando o calcário foi incorporado na camada de 0 a 20 cm. Este resultado pode estar atrelado a adição do calcário em todo o volume de solo revolvido, o que permite maior contato entre o corretivo e as fontes de acidez, assim como descrito por Rozane et al., (2017). Entretanto, nas camadas subsequentes, os valores de saturação por bases foram bem menores e não apresentaram diferença em relação ao tratamento controle.

A soma de bases também foi influenciada pela incorporação de calcário em camadas de solo distintas. Os maiores valores de soma de bases encontrados foram de 6,26 e 6,50 cmolc dm^{-3} , obtidos nas camadas com incorporação do corretivo até 10 e 20 cm de profundidade quando comparado com o tratamento controle sem aplicação de calcário. Devido a incorporação e sua composição, o calcário proporcionou alterações nos atributos químicos do solo, elevando principalmente os teores de Ca e Mg. Desse modo, boa parte desses cátions são atraídos e armazenados nas cargas negativas que compõem a CTC, e conseqüentemente influenciando na alteração da soma de bases. A incorporação do corretivo também influenciou na soma de bases com pequenos incrementos além das camadas de incorporação, variando de 1,20 no tratamento controle para 1,53 cmolc dm^{-3} quando houve incorporação até 10 cm. De acordo com Nunes et al. (2019), os efeitos da calagem a curto prazo tendem a ser limitados ao local onde o material foi aplicado ou incorporado, mesmo em solos com alto teor de areia e alta precipitação anual. No entanto, como não avaliamos o solo de forma estratificada, mas o volume total das camadas subsequentes, é possível que o efeito da calagem sobre a soma de bases tenha sido diluído, assim como observado por Calegari et al. (2013) ao testar os efeitos da calagem em diferentes sistemas de manejo sobre a acidez do solo.

Com a correção da acidez do solo, o acréscimo nos teores de P ocorreu somente nos tratamentos com incorporação do calcário nas camadas de 0 a 10 e 0 a 20 cm, porém o incremento foi insuficiente para atingir os níveis adequados para o desenvolvimento das culturas de milho e trigo (Tabela 5). Em relação às profundidades de incorporação avaliadas, verificou-se que houve incremento de P nas camadas subsequentes, sendo que o maior efeito encontrado ocorreu quando o corretivo foi incorporado até 5 e 10 e cm de profundidade. Segundo Tristan et al. (2016) os efeitos da calagem na disponibilidade de

P nas camadas além do local de incorporação, podem estar relacionados a ação do carbonato no pH nas camadas superficiais. De acordo com os autores, o aumento do pH favorece o desenvolvimento de cargas negativas, que aumentam a mobilidade do fosfato e reduz a adsorção de P devido à troca de ligantes. Além disso, considerando a baixa mobilidade do P, outra provável explicação para esse acúmulo nas camadas subsequentes àquelas que receberam calcário pode ter sido em virtude do local de deposição do superfosfato triplo na adubação do segundo cultivo de milho. Efeitos semelhantes foram relatados por Leal et al (2008), que também constataram o acréscimo de P em profundidade ao avaliarem os efeitos dos modos de aplicação do calcário nos atributos químicos de um Latossolo Vermelho distrófico.

Tabela 5 - Teores de nitrogênio, fósforo e potássio do solo após cultivos sucessivos de milho e trigo após a aplicação de calcário em diferentes camadas de incorporação em um Nitossolo Vermelho.

Nutriente (mg kg ⁻¹)	Camada com Calcário					
	0	1,0	2,5	5,0	10,0	20,0
N	2,8	3,16	3,2	3,34	3,2	2,67
P	1,85b	1,86b	2,00b	1,97b	3,1ab	3,91a
K	152,5a	44,25c	42,75c	26,75d	28,75d	65,00b
	Camada abaixo da calcariada					
N	2,8	2,72	2,70	2,78	2,5	-
P	1,85c	2,95bc	2,96bc	3,51ab	4,2a	-
K	152,5	143,5	162,5	165,8	172,8	-

Médias seguidas de letras distintas na linha apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5%. Fonte: Elaborada pela autora, (2022).

Verificou-se que os teores de K das frações de solo corrigidas foram menores em relação ao tratamento controle, principalmente quando ocorreu a incorporação do calcário até 5 e 10 cm de profundidade, dos quais variaram de 26,75 a 28,75 mg dm⁻³, respectivamente, muito abaixo dos teores recomendados pelo Manual de Adubação e Calagem para os Estados do RS e SC (CQFS-RS/SC, 2016). Comportamento semelhante também foi observado por Tiritan et al. (2016), que ao avaliarem as mudanças químicas em um solo após a aplicação superficial e incorporada de calcário, relatam que houve redução dos níveis trocáveis de K⁺ em todas as camadas avaliadas, independentemente do modo de aplicação do calcário.

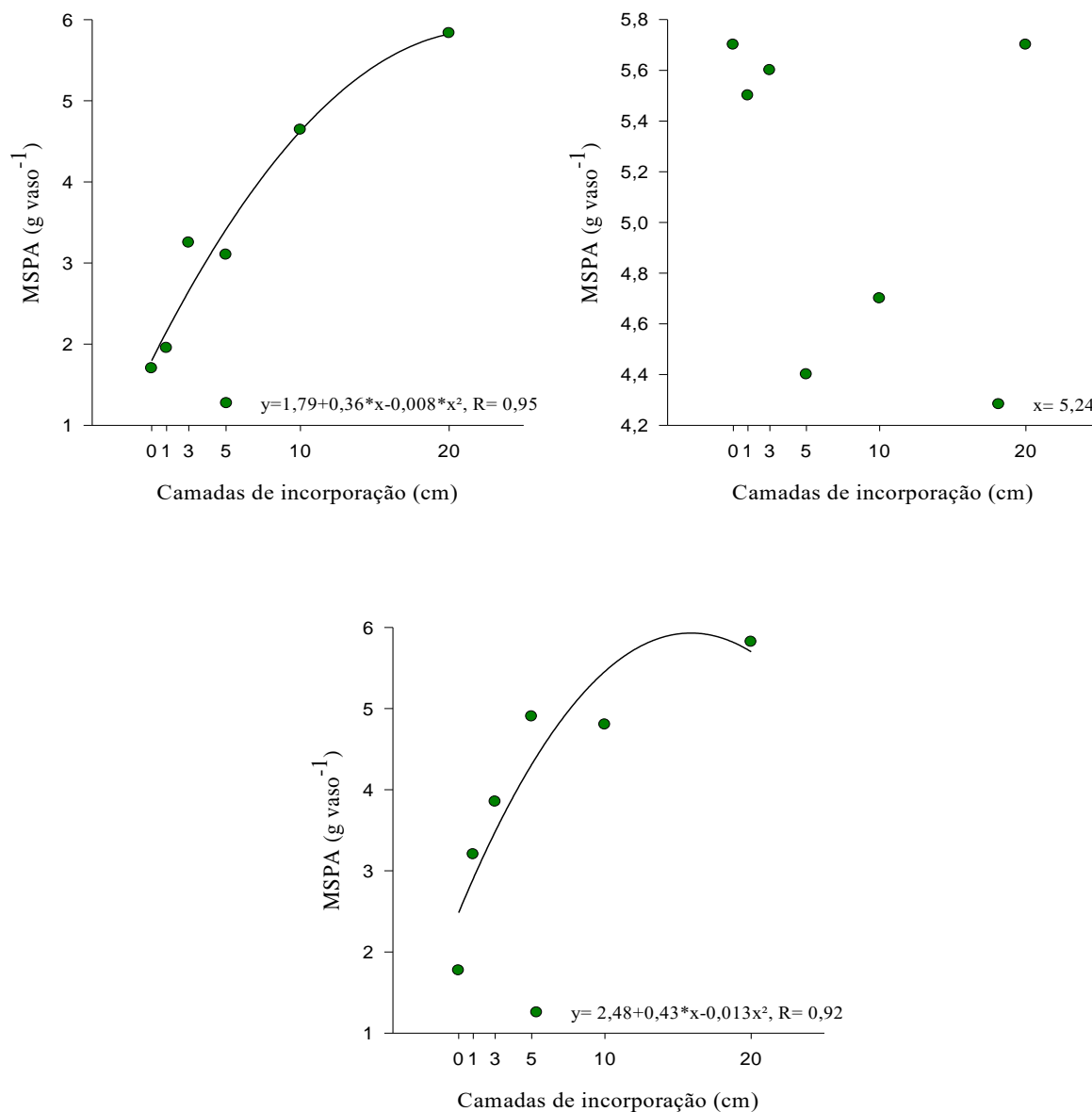
A redução do K na solução do solo pode ter ocorrido em virtude da absorção pelas plantas, devido a maior concentração de raízes nas frações corrigidas e também pela a

presença predominante de cargas elétricas dependentes do pH geradas pela calagem. Desse modo, a diminuição do K na solução do solo ocorre devido a maior adsorção eletrostática causada pelo aumento das cargas elétricas negativas livres, geradas pela precipitação do Al trocável e pela dissociação do H^+ da superfície dos componentes sólidos (ERNANI et al., 2012). Além disso, de acordo com Oliveira et al. (2001), a disponibilidade de K no solo possui forte relação com a disponibilidade de outros elementos, principalmente do Ca e do Mg, sendo que estes são predominantes nos complexos de troca por serem divalentes, então como a calagem promove aumento nos teores desses elementos no solo, pode ocorrer a redução e até a deficiência de K às plantas. Os teores de K das camadas além do local de aplicação do corretivo não apresentaram diferença quando comparadas com o tratamento controle, mantendo seus teores adequados para o desenvolvimento das culturas de interesse agrônômico.

3.4.2.2 Matéria seca da parte aérea e teores de nutrientes do milho e do trigo

A correção da acidez do solo em diferentes camadas de incorporação proporcionou resposta quadrática crescente na produção de MSPA no primeiro e terceiro cultivos (Figura 9). Segundo Castro; Crusciol (2013) a correção da acidez do solo melhora a fertilidade do solo e, portanto, a nutrição de plantas, levando a um melhor desenvolvimento das culturas. No primeiro cultivo todos os tratamentos que receberam incorporação de calcário apresentaram aumento na produção de MSPA em relação ao tratamento controle. Porém, o maior incremento foi observado quando houve incorporação de calcário até 20 cm de profundidade, com um acréscimo de 25,4 % quando comparado com a incorporação até 10 cm de profundidade. No terceiro cultivo, os tratamentos com incorporação do corretivo da acidez até as camadas de 0 a 5, 0 a 10 e 0 a 20 cm apresentaram os maiores acréscimos na MSPA, 4,9, 4,8 e 5,8 g vaso⁻¹. Já o tratamento com incorporação até a camada de 1 cm proporcionou a menor produção de MSPA no trigo, apresentando 3,2 g vaso⁻¹. De acordo com os resultados obtidos, mesmo com poucas alterações nas características químicas entre os tratamentos, percebe-se a importância da redução da acidez para a obtenção de bons rendimentos na MSPA das culturas, assim como relatado por Cravo et al. (2012) ao testarem a influência da calagem na produtividade de culturas anuais.

Figura 9 - Produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) das plantas de milho (A) e (B) e trigo (C), cultivadas em casa de vegetação após aplicação de calcário em diferentes profundidades em um Nitossolo Vermelho.



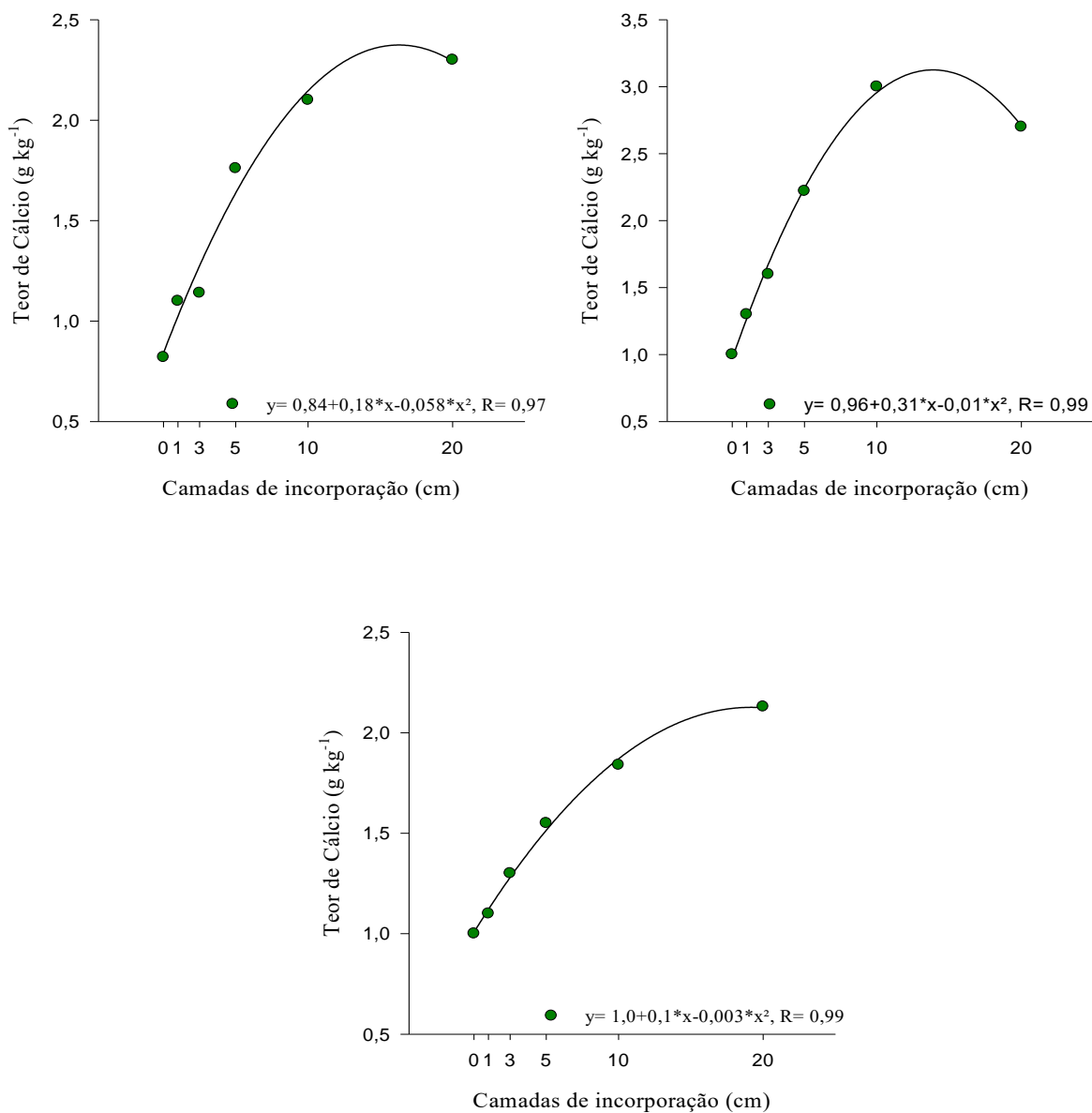
Fonte: Elaborado pela autora, (2022).

A adição de calcário em diferentes camadas de incorporação influenciou nos teores de macronutrientes nas folhas e caules dos tecidos vegetais de milho e trigo (Figura 10). As concentrações de Ca aumentaram de forma quadrática nos tecidos das plantas após a calagem. Para os três cultivos, os maiores incrementos foram observados quando o calcário foi incorporado nas camadas até 10 e 20 cm de profundidade, sendo que para

estes tratamentos as concentrações de Ca atingiram 2,08 e 2,3 g kg⁻¹ no primeiro cultivo, 2,89 e 2,70 g kg⁻¹ 1,84 e 2,13 g kg⁻¹ no terceiro cultivo, respectivamente. Contudo, apesar do incremento observado, no primeiro cultivo de milho apenas o tratamento com incorporação de calcário até a camada de 20 cm apresentou teores considerados como satisfatórios para o desenvolvimento da cultura, já para o segundo cultivo de milho esse efeito foi observado quando se incorporou o corretivo nas camadas de 0 a 10 e 0 a 20 cm, e no terceiro cultivo, os teores de Ca encontrados não alcançaram os níveis desejáveis para o desenvolvimento do trigo em nenhum dos tratamentos.

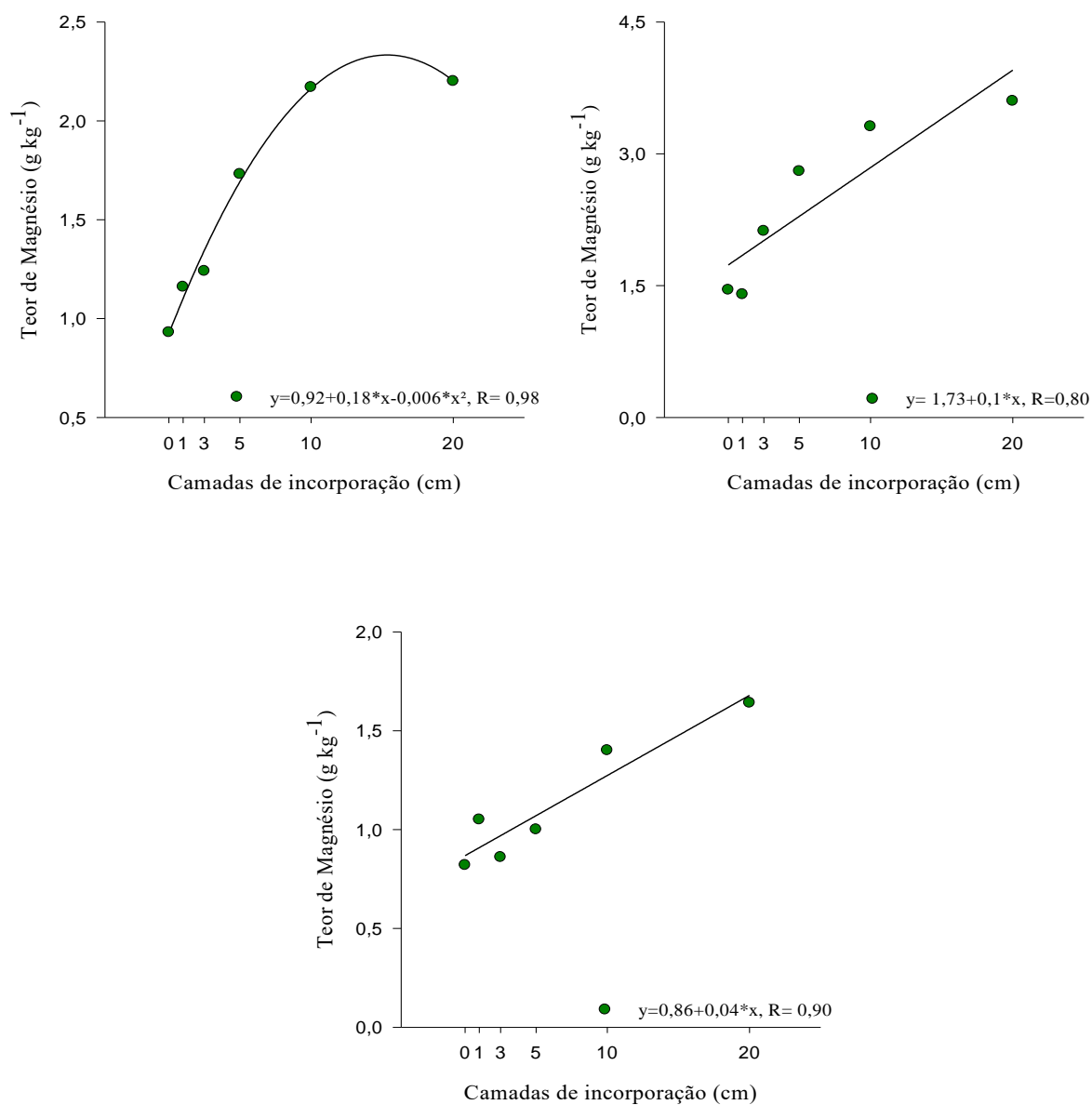
Esses incrementos também foram observados para os teores de Mg da parte aérea das plantas de milho e trigo, apresentando resposta quadrática crescente para o primeiro cultivo e linear para o segundo e terceiro cultivo (Figura 10). Para o primeiro e o segundo cultivo de milho, os maiores acréscimos de Mg foram encontrados nos tratamentos com incorporação do corretivo nas camadas de 0 a 5, 0 a 10 e 0 a 20 cm, os quais atingiram 1,73, 2,20 e 2,17 g kg⁻¹ no primeiro cultivo e 2,78, 3,31 e 3,55 g kg⁻¹ no segundo cultivo. Para o terceiro cultivo, os maiores teores de Mg nos tecidos de trigo foram de 1,84 e 2,13 g kg⁻¹, os quais foram observados nos tratamentos com incorporação do calcário nas camadas até 10 e 20 cm. Os teores ideais de Mg no tecido vegetal de milho variam de 1,5 a 5,0 g kg⁻¹, desse modo, os teores de Mg encontrados nos dois cultivos estão dentro dos níveis considerados como satisfatórios para a cultura. No cultivo do trigo, os teores ideais de Mg no tecido vegetal variam de 1,5 a 4,0 g kg⁻¹, portanto, no terceiro cultivo somente o tratamento com incorporação até 20 cm está dentro dos parâmetros considerados como adequados para a cultura. De acordo com Castro e Crusciol (2015) a aplicação do calcário para a correção da acidez aumentou os teores de Ca e Mg no solo e, consequentemente, nos tecidos vegetais.

Figura 10 - Teores de cálcio nos tecidos vegetais das plantas de milho (A) e (B) e trigo (C) cultivadas em casa de vegetação após aplicação de calcário em diferentes camadas de incorporação em um Nitossolo Vermelho.



Fonte: Elaborado pela autora, (2022).

Figura 11 - Teores de magnésio nos tecidos vegetais das plantas de milho (A) e (B) e trigo (C) cultivadas em casa de vegetação após aplicação de calcário em diferentes camadas de incorporação em um Nitossolo Vermelho.



Fonte: Elaborado pela autora, (2022).

Embora a calagem reduza a acidez do solo e aumente a disponibilidade de nutrientes às plantas (MELO et al., 2011), percebe-se que com o aumento da camada de incorporação do calcário no solo, houve redução nos teores de N para o primeiro e o terceiro cultivo. Nos tratamentos com incorporação de calcário até a profundidade de 20 cm, o teor de N atingiu 19,7 g kg⁻¹ no primeiro cultivo de milho, sendo considerado como insuficiente para o desenvolvimento da cultura. Para o cultivo de trigo, o teor de N observado foi de 21,4 g kg⁻¹, o qual ficou dentro da faixa adequada para a nutrição da

cultura. Uma vez que a adição de calcário incorporado não afetou o teor de N no solo, supõe-se que esse decréscimo pode ter sido decorrente do efeito de diluição de nutrientes nos tecidos das plantas.

Em relação aos teores de P nos tecidos das culturas, quando se incorporou o calcário até 20 cm de profundidade, os resultados obtidos mostram que ocorreu a redução com ajuste quadrático nos três cultivos avaliados em comparação ao tratamento controle. Os teores de P encontrados nos tecidos vegetais variaram de 3,96 a 0,93 g kg⁻¹ no primeiro cultivo, 1,70 a 1,04 g kg⁻¹ no segundo cultivo e 3,01 a 2,10 g kg⁻¹ no terceiro cultivo, nos tratamentos controle e no e com incorporação do corretivo até a camada de 20 cm, respectivamente. Para os dois cultivos do milho, quando se incorporou o calcário até 20 cm de profundidade, os teores de P ficaram abaixo da suficiência limite para a cultura, que varia de 1,9 a 4,0 g kg⁻¹. Já para o cultivo de trigo, os teores de P ficaram dentro dos níveis considerados com ideais para o desenvolvimento da cultura (2,1 a 3,3 g kg⁻¹), mesmo que os teores tenham sido reduzidos no tratamento com incorporação do corretivo até 20 cm de profundidade em comparação ao tratamento controle. Segundo Marschner (2012), o P é responsável pelos processos de armazenamento e transferência de energia da célula, na respiração e na fotossíntese. Além disso, as limitações na disponibilidade de P podem resultar em restrições no desenvolvimento, das quais a planta não se recupera posteriormente, mesmo aumentando o suprimento de P a níveis adequados (GRANT et al., 2001). No entanto, essa redução pode ser reflexo de alguns fatores, como, por exemplo, efeito da diluição pelo maior crescimento das plantas conforme o aumento do volume de incorporação, como já citado anteriormente, além dos baixos teores de P encontrados no solo.

Os teores de K na parte aérea dos cultivos foram influenciados pela profundidade de incorporação do calcário apenas no segundo e no terceiro ciclo de cultivo situando-se na faixa de 36,88 para a cultura do milho e 21,40 g kg⁻¹ para a cultura do trigo, quando o corretivo foi incorporado na camada de 0 a 20 cm (Figura 10). Portanto, esses teores podem ser considerados como adequados para ambas as culturas, tendo em vista que os valores considerados ideais para o trigo variam de 15 a 30 g kg⁻¹ e 17 a 35 g kg⁻¹ para o milho. Segundo Neves et al. (2008) a prática da calagem aumenta os teores de Ca e Mg no solo, alterando as relações entre os nutrientes. Dessa forma, a absorção de um elemento pode ser influenciada pela presença de outro, podendo ocorrer efeito antagônico, inibitório ou sinérgico entre eles. Desse modo, os resultados encontrados mostram que a

redução dos teores de K no trigo, pode estar ligada a inibição competitiva durante o processo de absorção.

Tabela 6 - Teores de nitrogênio, fósforo e potássio nos tecidos vegetais das plantas de milho e trigo cultivadas em casa de vegetação após aplicação de calcário em diferentes camadas de incorporação em um Nitossolo Vermelho.

Cultivo	Nutriente	Camadas de incorporação (cm)						Equação	R ²
		0	1	2,5	5	10	20		
Milho	N	29,8	31,9	22,9	20,4	18,9	19,7	$y=30,4-2,1*x+0,07*x^2$	0,84
	P	3,9	3,9	1,9	1,6	1,2	0,93	$y=1,20-0,15*x+0,005*x^2$	0,94
	K	30,8	38,2	30,2	30,2	33,4	34,6	ns	-
Milho	N	15,1	16,5	14,9	15,4	17,3	18,6	ns	-
	P	1,7	1,6	1,3	0,6	0,9	1,04	$y=1,65-0,16*x+0,006*x^2$	0,71
	K	26,5	27,4	24,2	21,8	30	36,8	$y=26-0,32*x+0,04*x^2$	0,81
Trigo	N	28,2	26,4	26	22,3	21,8	21,4	$y=27,7-1,0*x+0,03*x^2$	0,94
	P	3	2,8	2,1	1,7	1,9	2,1	$y=2,85-0,21*x+0,009*x^2$	0,78
	K	32	28,5	25,5	19,2	20	25,6	$y=31-2,35*x+0,1*x^2$	0,89

Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

3.4.2.3 *Matéria seca e outros parâmetros radiculares do trigo*

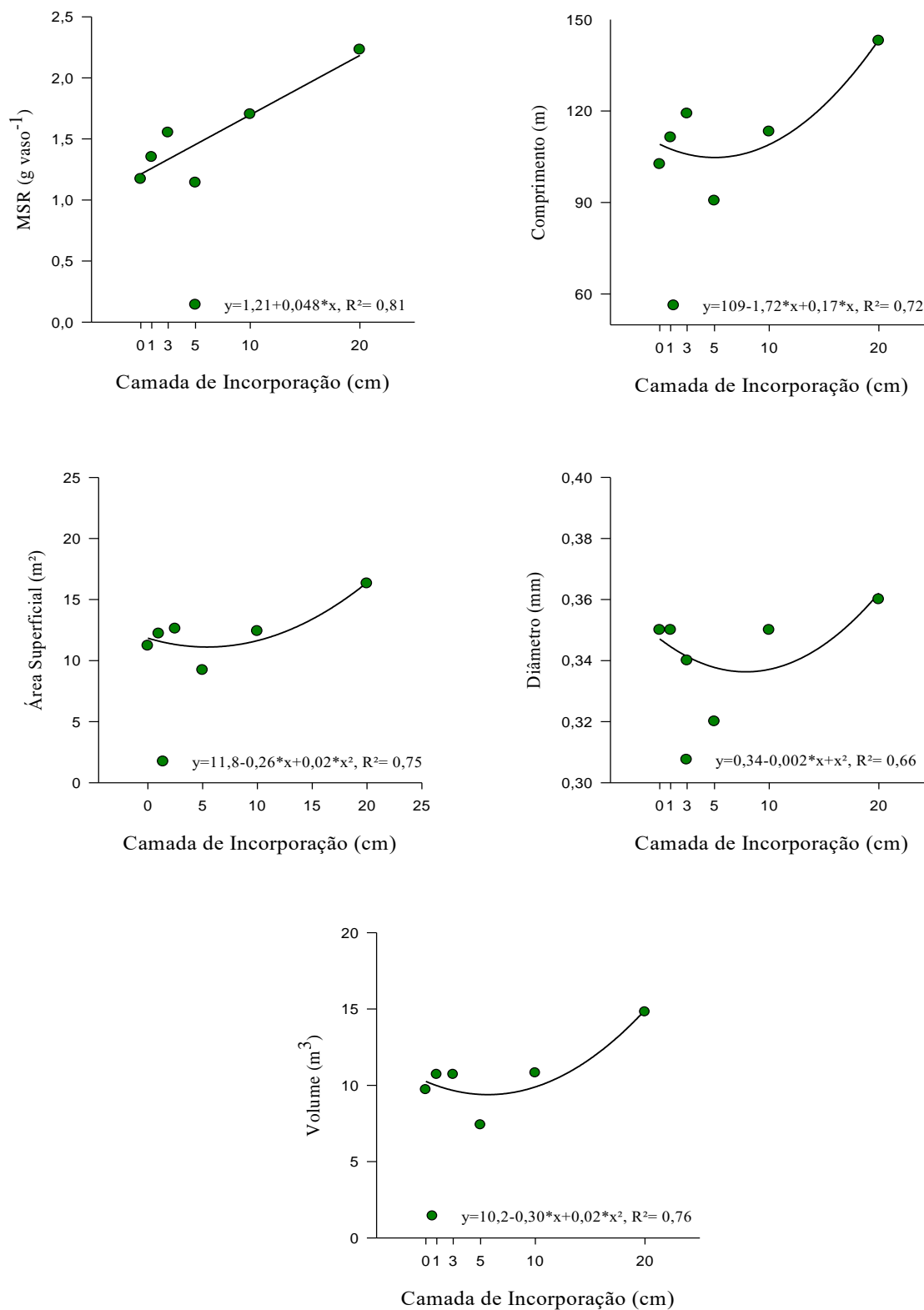
A MSR da cultura do trigo foi influenciada positivamente pela incorporação do calcário em camadas distintas (Figura 12). A maior produção de MSR foi obtida quando houve a incorporação do corretivo na camada de até 20 cm e a menor produção de MSR foi observada no tratamento com incorporação de calcário até 5 cm de profundidade, encontrando-se os valores médios de MSR de 1,14 e 2,23 g vaso⁻¹, respectivamente. Resultados semelhantes foram observados por Carmeis et al. (2017) que ao testarem os impactos da adição de calcário em um experimento de longa duração em um Latossolo Vermelho verificaram que a adição do corretivo aumentou a matéria seca do trigo em até 210% na camada de 0 a 20 cm. Segundo Besen et al. (2021), esse resultado pode ser explicado pelos efeitos do calcário na alcalinização do solo, no aumentando do pH e nos teores de Ca²⁺ e Mg²⁺, que juntamente com a neutralização do Al³⁺, proporcionaram condições apropriadas para o desenvolvimento radicular das plantas.

A calagem também proporcionou o aumento do comprimento radicular nas plantas de trigo, sendo que o maior valor foi observado quando se incorporou o calcário na camada de até 20 cm e o menor comprimento de raízes foi encontrado no tratamento com a incorporação do corretivo até 5 cm de profundidade, seguindo a mesma tendência da MSR. De acordo com, Melo et al. (2013) solos ácidos possuem altos teores de Al^{3+} , que retarda o crescimento e o desenvolvimento do sistema radicular, promove a redução do número de raízes laterais, o que acaba diminuindo o volume de solo explorado pela planta, limitando a absorção de água e nutrientes. Desse modo, a resposta positiva da calagem no comprimento radicular está relacionada a redução dos níveis tóxicos de Al e ao aumento da concentração de Ca e Mg, que são essenciais para o crescimento das raízes. Segundo, Silva et al. (2004), o aumento nos teores de Ca e Mg está relacionada à síntese da parede celular, uma vez que estes nutrientes participam da formação dos compostos de pectatos de Ca e Mg.

A área superficial radicular apresentou comportamento semelhante a MSR e ao comprimento, sendo que o menor valor foi observado no tratamento com incorporação do corretivo até a camada de 5 cm, apresentando 9,16 m². Quando a calagem foi realizada até a profundidade de 20 cm, houve incremento na ASR, chegando a 16,27 m². De acordo com Silva et al. (2004), o aumento da ASR ocorre em virtude do maior comprimento radicular, causado pela incorporação do corretivo da acidez. De acordo com os autores, esse aumento torna-se benéfico, uma vez que, com maior superfície de contato, as raízes têm maior capacidade em absorver nutrientes e água da solução do solo, podendo resultar em uma maior produtividade.

Quanto ao diâmetro radicular, o tratamento com adição de calcário até a profundidade de 5 cm proporcionou o menor diâmetro de raízes, apresentando 0,32 mm. Já o tratamento onde se incorporou o corretivo da acidez até a camada de 20 cm promoveu o aumento do diâmetro das raízes de trigo, chegando a 0,36 mm. Para o volume radicular a resposta foi quadrática crescente com a adição de calcário nas diferentes frações de solo, sendo que o maior incremento ocorreu com a aplicação de calcário incorporado na profundidade de 0 a 20 cm, com 14,75 m³. Já o tratamento onde se incorporou o corretivo na camada de até 5 cm promoveu o menor incremento no volume de raiz, apresentando 7,38 m³, no entanto, não apresentou grandes diferenças dos tratamentos controle e com a calagem até as profundidades de 0 a 1 e 0 a 2,5 cm. Este aumento observado no volume radicular pode estar relacionado ao incremento do comprimento das raízes e da ARS (SILVA et al., 2004).

Figura 12 - Produção de matéria seca de raiz (A), comprimento do sistema radicular (B), área superficial (C), Diâmetro (D) e volume (D) de plantas de trigo cultivadas em casa de vegetação após incorporação de calcário em um Nitossolo Vermelho.



Fonte: Elaborada pela autora, (2022).

3.5 CONCLUSÕES

As doses de calcário reduziram a atividade de Al^{3+} a, e proporcionaram o aumento da concentração de Ca, Mg, V% e soma de bases.

Os melhores resultados para a produção de MSPA nas plantas de milho e trigo do primeiro e terceiro cultivo foram observados nas maiores doses de calcário.

As plantas de milho do segundo cultivo apresentaram maior acréscimo de MSPA na dose de $1,5 \text{ Mg ha}^{-1}$.

A incorporação de calcário nas camadas a partir da superfície foi responsável pela redução do Al^{3+} no solo, aumento dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} e da saturação por bases (V%), tanto nas camadas com a incorporação do corretivo, quanto nas camadas subsequentes.

Os maiores teores de nutrientes na MSPA foram observados quando se incorporou o calcário nas camadas até 10 e 20 cm, assim como a produção de MSPA.

4 CAPÍTULO II - INFLUÊNCIA DAS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS DE CALCÁRIO NA CULTURA DO MILHO E NA NEUTRALIZAÇÃO DA ACIDEZ DO SOLO

4.1 RESUMO

Parte da eficiência do calcário na neutralização da acidez do solo está relacionada ao tamanho de partícula e ao poder de neutralização. Porém, doses e tempo de incubação também podem alterar a sua reatividade. O objetivo do trabalho, foi a) verificar a eficiência de tamanhos de partículas, doses e tempo de incubação na neutralização da acidez e na reatividade do calcário; b) avaliar os efeitos das frações granulométricas nos componentes da acidez do solo, na disponibilidade de nutrientes no solo, no teor de nutrientes da parte aérea dos tecidos vegetais e na produção de matéria seca das plantas. O estudo foi composto por dois experimentos, conduzidos em laboratório e casa de vegetação, sobre um Nitossolo Vermelho distroférico. O experimento para avaliar a reatividade do calcário foi realizado em laboratório, onde as unidades experimentais foram compostas pela aplicação de calcário em quatro frações granulométricas (2,00-0,84 mm; 0,84-0,30 mm; <0,30 mm e calcário comercial) incorporadas ao solo e com duas doses corrigidas para cada fração granulométrica, correspondendo a 4,5 e 9,0 Mg ha⁻¹ de calcário. Amostragens foram realizadas aos 15, 30, 60,90 e 120 dias após o início da incubação para a determinação do pH-H₂O, pH-CaCl₂, pH-SMP. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, onde aplicou-se diferentes frações de calcário dolomítico (2,00 -0,84 mm (P20), 0,84-0,30 mm (P50), < 0,30 mm (FP), calcário comercial, combinação P20 + P50, combinação FP + P50) em plantas de milho, com dose corrigida pelo pH-SMP para elevar o pH para 5,5, correspondendo a 6 Mg ha⁻¹ de calcário. Os atributos químicos do solo, teores de nutrientes nos tecidos vegetais e produção de matéria seca foram avaliados após ciclos de cultivo. Os resultados mostraram as partículas < 0,30 só atingiram 100% de reatividade após 120 dias de incubação na maior dose testada. Quanto aos efeitos dos tamanhos de partícula no cultivo de milho, o pH foi maior nos tratamentos calcário comercial e com a presença de partículas < 0,30 mm, porém todas as frações granulométricas apresentaram o mesmo comportamento na redução da m%, Al⁺³, H+Al e no incremento de Ca, Mg, V% e soma de bases. Não houve efeito das diferentes frações na MSPA das plantas de milho.

4.2 INTRODUÇÃO

A prática de correção da acidez do solo é essencial para alcançar maiores produtividades das culturas de interesse agrícola, uma vez que a maioria dos solos cultiváveis no território brasileiro, são ácidos (DEUS et al., 2014). O uso do calcário para neutralizar a acidez é uma prática amplamente difundida, porém, a sua eficiência depende do seu poder de neutralizar a acidez do solo, o qual é conhecido como poder relativo de neutralização total (PRNT). O PRNT é calculado levando em consideração a ação combinada dos fatores químicos, poder de neutralização (PN) e dos atributos físicos, reatividade (ER) do corretivo. De acordo com Ratke et al. (2018); Soratto et al. (2019) o PN indica o potencial químico do corretivo para neutralizar a acidez e a ER indica qual a velocidade da correção da acidez no período de três meses e depende do tamanho de partícula do calcário.

Devido à baixa solubilidade do calcário em água, a capacidade de neutralizar a acidez depende da granulometria, uma vez que a dissolução ocorre devido a área superficial do corretivo em contato com o solo (GONÇALVES et al., 2011). Dessa forma, quanto mais fino for o corretivo, mais rápida será a reação do material, desde que o solo esteja úmido (ALCARDE et al., 1989; RODRIGHEREO et al., 2015). Na legislação brasileira os calcários com fração granulométrica de 2,00 a 0,84 possuem 20% de RE, frações entre 0,84 a 0,30 mm apresentam 60% e partículas < 0,30 mm possuem 100% de RE. Entretanto, trabalhos indicam que a moagem excessiva do calcário aumenta os custos de produção e possuem menor efeito residual no solo do que partículas > 0,30 mm, o que aumenta a necessidade de reaplicação em um curto período de tempo (QUAGGIO, 2000).

Nesse contexto, em um estudo com o objetivo de avaliar o efeito da aplicação de diferentes frações de calcário nos componentes da acidez e na produtividade de milho em SPD, Ratke et al. (2018), constataram que calcários com diferentes granulometrias apresentaram efeitos semelhantes no aumento dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , na redução do Al^{3+} e no rendimento de milho durante o primeiro ano da safra. Da mesma forma em um estudo avaliando os efeitos de diferentes frações de calcário dolomítico, Alvares et al. (2009) relataram que o Al^{3+} foi significativamente menor, quando utilizou-se partículas menores 0,25 mm, sendo que o mesmo efeito foi observado para o tratamento com partículas de 2,00 mm.

A partir disso é possível afirmar que partículas > que 0,30 mm são tão eficazes quanto frações granulométricas menores, devido ao seu maior efeito residual no solo.

Devido a essas características, materiais com maiores tamanhos de partículas tornam-se vantajosos, uma vez que mantêm a fertilidade do solo e aumenta o período de tempo entre uma aplicação e outra, reduzindo assim os custos de produção (RATKE et al., 2018)

Diante disso, dois experimentos foram conduzidos, 1) realizado com o intuito avaliar os efeitos das diferentes frações granulométricas, doses e tempo de incubação na neutralização da acidez e na reatividade do calcário; 2) avaliar a resposta dos diferentes tamanhos de partícula de calcário nos componentes da acidez, na disponibilidade de nutrientes no solo, no teor de nutrientes nos tecidos vegetais e produção de matéria seca das plantas de milho.

4.3 MATERIAL E MÉTODOS

Realizou-se um estudo constituído por dois experimentos, os quais foram conduzidos no laboratório de Química e Fertilidade do Solo e em casa de vegetação no Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), sendo o primeiro experimento conduzido no período de setembro de 2019 a janeiro de 2020 e o segundo no período de janeiro de 2021 a setembro de 2021.

4.3.1 Solo e análises de caracterização

O solo utilizado foi o Nitossolo Vermelho distroférico, localizado em uma área de vegetação nativa, nas margens da BR - 116 no município de Capão Alto -SC, o qual foi coletado na camada arável de 0 a 20, peneirado em peneira de malha 4 mm e encaminhado para o local de condução do estudo.

Anteriormente à implantação do experimento, as amostras de solo foram secas ao ar e peneiradas em malha de 2 mm para realização das análises de caracterização química, seguindo a metodologia proposta por Tedesco et al. (1995). As propriedades químicas do solo apresentaram os seguintes valores: $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$: 4,7; pH-SMP : 5,1; Al: $2,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ MO: 2,0 %; argila: 79%; P: $0,9 \text{ mg dm}^{-3}$; K: 117 mg dm^{-3} ; Ca^{+2} : $0,93 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Mg^{+2} : $0,25 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; H+Al: $11,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e CTC_{pH7}: $14 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Os cálculos de calagem e adubação foram baseados nos resultados da análise do solo antes da instalação do

experimento e nas recomendações da Comissão de Química e Fertilidade do Solo para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (CQFS-RS/SC, 2016).

O material corretivo utilizado nos três experimentos foi o calcário dolomítico com 28% de CaO e 20% de MgO, e suas análises químicas e físicas (tabela 3) foram realizadas no laboratório de Química e Fertilidade do Solo - no Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC). Para a análise física, o calcário foi dividido nas frações granulométricas desejadas por meio das partículas retidas nas peneiras, ABNT nº 10 ($\varnothing = 2,00 - 0,84$ mm), ABNT nº 20 ($\varnothing = 0,84 - 0,30$ mm), ABNT nº 50 ($\varnothing = 0,30$ mm) e fundo de peneira ($\varnothing < 0,30$ mm). Através dos resultados obtidos, foi possível realizar o cálculo da eficiência relativa (ER) conforme a equação a seguir:

$$\text{ER (\%)} = (\text{fração} > 2 \text{ mm} \times 0) + (\text{fração entre } 2 \text{ mm e } 0,84 \text{ mm} \times 0,2) \\ + (\text{fração entre } 0,84 \text{ mm e } 0,30 \text{ mm} \times 0,6) + (\text{fração} < 0,30 \text{ mm} \times 1,0)$$

Sendo:

Fração > 2 mm: quantidade do produto que fica retido na peneira nº 10;

Fração 2 mm e 0,84 mm: fração que passa na peneira nº 10 e fica retida na peneira nº 20;

Fração 0,84 mm e 0,30 mm: fração que passa na peneira nº 20 e fica retida na peneira nº 50;

Fração < 0,30 mm: fração que passa na peneira nº 50 e fica retida no coletor.

A avaliação química das frações do calcário foi realizada para determinar o poder de neutralização (PN) do corretivo conforme descrito por TEDESCO et al. (1995). O poder relativo de neutralização total (PRNT) foi calculado a partir da determinação dos valores da ER e do PN pela seguinte equação:

$$\text{PRNT} = (\text{ER} \times \text{PN})/100$$

Tabela 7 - Tabela 6: Características químicas e físicas do calcário dolomítico.

Fração (mm)	ER (%)	PN (%)	PRNT (%)
2,00-0,84	20	93	18,6
0,84-0,30	60	93	55,8
<0,30	100	93	93
Calcário Comercial	94	93	87

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

4.3.2 Descrição dos tratamentos, análises químicas e análise estatística

No experimento 1, onde se avaliou a reatividade das frações granulométricas do calcário e a velocidade com que o corretivo neutraliza a acidez do solo, o delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado em esquema fatorial (4 frações granulométricas x 2 doses) com quatro repetições, totalizando em 36 parcelas.

Os tratamentos foram constituídos pela aplicação de calcário, separado nas frações granulométricas a seguir: fração 2,00 -0,84 mm (nº 20), fração 0,84-0,30 mm (nº 50), fração < 0,30 mm e calcário comercial, contendo todas as frações, além da aplicação de duas doses, as quais corresponderam a 0,50 e 1,0 vez a quantidade recomendada pelo método SMP para elevar o pH-H₂O para 6,0, sendo que a dose integral correspondeu a 9 t ha⁻¹.

Aplicou-se as doses de calcário, que foram devidamente corrigidas através do PRNT de cada fração, então homogeneizou-se 1,5 kg de solo (base seca) com a quantidade de calcário correspondente a cada tratamento e transferiu-se a mistura para sacos plásticos capazes de permitir as trocas gasosas durante o processo de incubação. Após a homogeneização do calcário com o solo, as amostras foram umedecidas com água destilada para elevar a capacidade de campo até aproximadamente 80%, mantendo-se esse teor até o final do ensaio, por meio de pesagens periódicas e irrigação.

A coleta de amostras de solo foi realizada aos 15, 30, 60, 90 e 120 dias após o início da incubação. Após homogeneização de cada repetição, retirou-se aproximadamente 40g de solo úmido. Posteriormente, as amostras foram secas em estufa a 105 °C, moídas para diâmetro de partículas inferior a 2,0 mm e armazenadas para análise. Nas amostras de solo foram determinados o pH em água, pH SMP e pH em KCl 1 mol L⁻¹. As determinações de pH-H₂O e pH-SMP foram realizadas conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995), e pH em KCL, que foi quantificado conforme metodologia proposta pela EMBRAPA, 2017. Foi, ainda, calculada a acidez potencial (H+Al), que é estimada pelo índice SMP e obtido pela equação estabelecida por Kaminski et al. (2001).

Para avaliar a eficiência das frações granulométricas na correção da acidez do solo, geralmente adota-se como parâmetro uma fração que apresenta a reação completa, e com base no seu efeito sobre o pH do solo. Desse modo, avaliou-se a eficiência relativa das frações granulométricas do calcário de acordo com a variação dos valores de pH ocorridos no período de 120 dias de incubação. Como parâmetro de referência, utilizou-

se o acréscimo promovido no pH do solo na fração granulométrica $> 0,30$ mm (que ficou retida no fundo de peneira) em relação ao pH inicial do solo. Para esse incremento, foi atribuída a eficiência de 100% e a partir disso, foi possível determinar o aumento do pH proporcionado pelas demais frações granulométricas do calcário. De acordo com a legislação, a fração $< 0,30$ mm é utilizada com $ER = 100\%$ e, por esse motivo, escolhida como referência.

Os dados obtidos foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk para a verificação da normalidade. Posteriormente, procedeu-se a análise de variância (ANOVA) e os efeitos significativos foram desdobrados pelo teste de Scott - Knott ao nível de significância de 5%. As análises foram realizadas com auxílio dos programas estatísticos SISVAR 5.6 e Past 3.19 e a elaboração dos gráficos feita através do programa SigmaPlot 11.0.

O experimento 2 foi realizado com o intuito de avaliar o efeito das frações granulométricas nas características químicas do solo, no teor de nutrientes e na produção de matéria seca do milho. A cultura do milho foi a escolhida, devido a sua relevância econômica e alta exigência nutricional.

Os tratamentos foram constituídos por frações granulométricas com os seguintes tamanhos de partículas 2,00 -0,84 mm (P20), 0,84-0,30 mm (P50), $< 0,30$ mm (FP), calcário comercial, combinação P20 + P50, combinação FP + P50 e um tratamento controle sem aplicação de calcário. O experimento foi conduzido utilizando o delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições para cada tratamento.

O cálculo da calagem foi baseado nos resultados da análise de solo realizada anteriormente à instalação dos experimentos. A quantidade de calcário recomendada pelo método SMP para elevar para 5,5 o pH-H₂O da camada de 0 a 20 cm correspondeu a 6 t ha⁻¹. A quantidade de calcário foi devidamente corrigida através do PRNT de cada fração, considerando para todos os tratamentos o mesmo valor de PN, com base na fração mais fina (FP) e assumindo a ER pré-estabelecida pela legislação brasileira (tabela 7). Após a homogeneização do calcário, o solo foi umedecido com água destilada para elevar a capacidade de campo até 80% e então, acondicionados em sacos plásticos com capacidade de 50 kg, capazes de permitir as trocas gasosas e cobertos por lona preta para o processo de incubação durante um período de 45 dias para possibilitar a reação do calcário com o solo.

Após o período de incubação, foi realizada a adubação sobre os 16 kg de solo de cada tratamento, colocando-se 120 mg kg⁻¹ de P via sólida, com superfosfato triplo (41%

de P_2O_5) e 150 mg kg^{-1} de K, onde foi utilizado o cloreto de potássio (58% K_2O), via líquida. Para a adubação nitrogenada, foi utilizada a ureia (45% N), via líquida, adicionando-se 100 mg kg^{-1} de N. Posteriormente a adubação, o solo foi colocado em vasos plásticos com capacidade de 6 litros com 4 kg de solo (base seca) para realizar a semeadura.

A cultura utilizada foi o milho (*Zea Mays* L.), cultivar 9776 VIP 2 no primeiro e no segundo cultivo (janeiro-março) e (abril-junho) respectivamente. A semeadura foi realizada diretamente no solo, sem pré-germinação para os dois cultivos. Quando as plantas atingiram aproximadamente 10 cm, foi realizado um raleio, permanecendo quatro plantas por vaso. A umidade do solo foi mantida através da pesagem dos vasos e adição de água destilada para manter a umidade próxima a 80% da capacidade de campo. Para o controle de pragas e doenças, foi utilizado o controle químico quando necessário e o controle das plantas daninhas foi realizado de forma mecânica.

A colheita da parte aérea foi realizada após completar 60 dias de condução de cada cultivo. A parte aérea das plantas (caules e folhas) foi cortada rente ao solo, armazenada em sacos de papel e seca em estufa de circulação forçada a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ até atingir peso constante. Em seguida, realizou-se a pesagem para a determinação da matéria seca da parte aérea (MSPA) e posterior moagem em moinho tipo Wiley. Para a determinação da concentração de nutrientes no tecido vegetal foi adicionado 0,2 g em tubos de digestão de 50 mL e adicionados 2 mL de H_2O_2 concentrado, 2 mL de H_2SO_4 concentrado e 0.7 g de mistura para digestão (100 g de Na_2SO_4 + 10 g de $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ + 1 g de Se) para realização da digestão sulfúrica em bloco. No extrato da digestão foi determinado N em destilador Kjeldahl (TE-0364, TECNAL), P pelo complexo fosfomolibdato em espectrofotômetro de absorção molecular (UV-1800, SHIMADZU) à 882 nm (Murphy and Riley, 1962), K por espectrometria de emissão atômica (DM -62, DIGIMED apparatus), Ca e Mg determinados em espectrofotômetro de absorção atômica. Concomitante foi coletado o sistema radicular o qual, após lavagem, foi mantido em álcool 70% em câmara fria para determinação da matéria seca das raízes (MSR). Ao término dos dois cultivos, realizou-se a coleta de solo para realização das análises de disponibilidade de nutrientes e componentes da acidez do solo. Foram determinados P e K pela solução extratora Mehlich 3, Ca, Mg e Al trocáveis pela extração com KCl 1 mol/L. Fósforo, K, Ca e Mg foram determinados pelos mesmo métodos descritos anteriormente, e o Al trocável foi determinado por titulometria com $NaOH$ 0,0125 mol/L. Foram calculados a acidez potencial (H+Al), saturação de bases da CTC (capacidade de

troca de cátions) (V%) e saturação da CTC por Al (m%) de acordo com CQFS-RS/SC (2016).

Os resultados foram submetidos à análise de variância e, quando significativos, a comparação das médias dos tratamentos foi pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade de erro. Para as análises estatísticas foi utilizado o programa SISVAR 5.6 e a elaboração dos gráficos, através do SigmaPlot 11.0.

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.4.1 Experimento I - Eficiência Relativa das Frações Granulométricas de Calcário

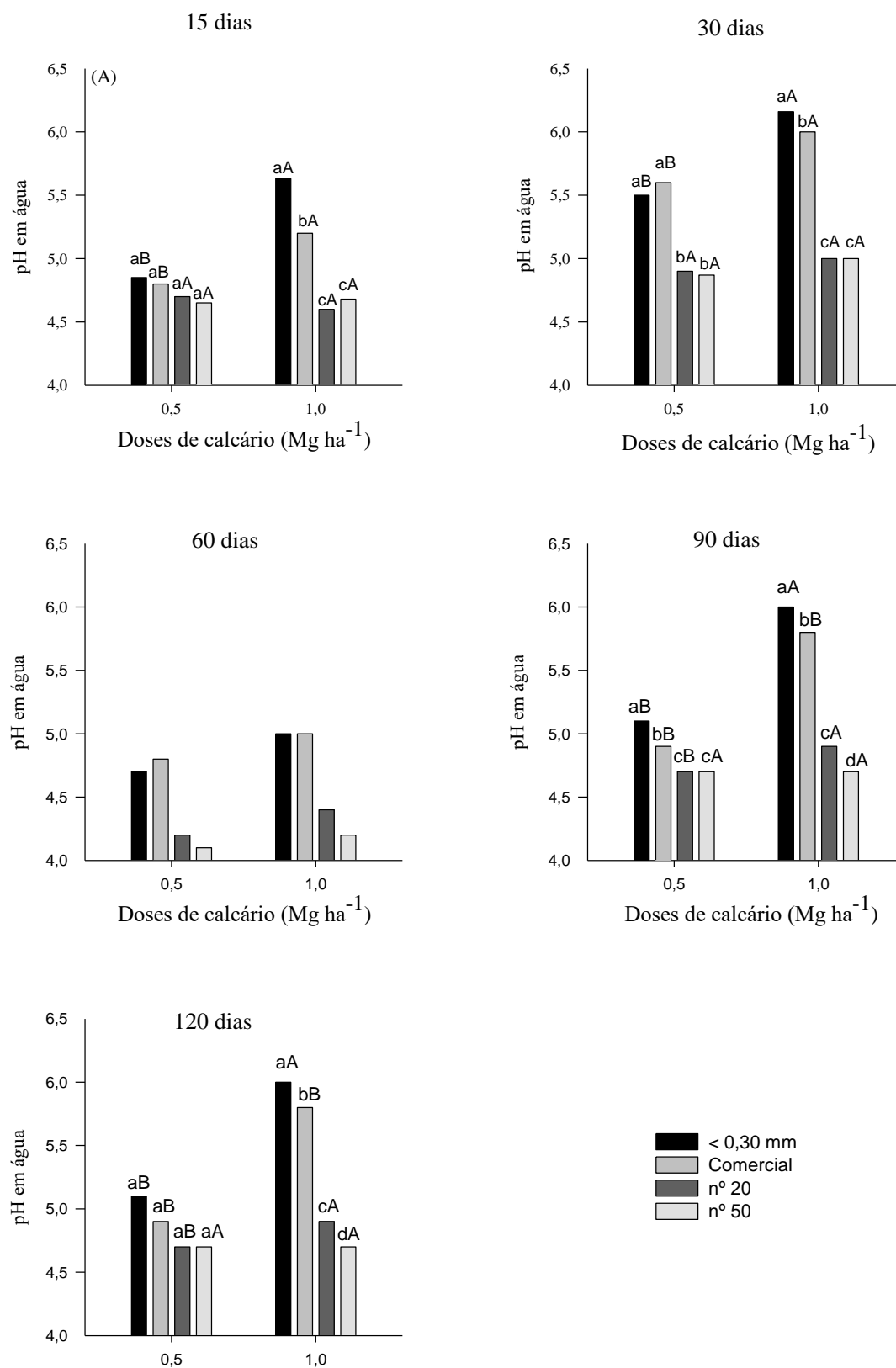
A partir dos resultados obtidos, ficou evidente que houve efeito significativo das frações granulométricas e das doses de calcário dolomítico, bem como a interação entre os dois fatores sobre as propriedades químicas do solo avaliadas (pH-H₂O, pH-KCl e H+Al) em todas as épocas de amostragem (15, 30, 60, 90 e 120 dias). Na primeira amostragem realizada aos 15 dias após a incubação, constatou-se que na metade da dose de calcário o pH-H₂O observado foi de 4,80 para os tratamentos < 0,30 mm e comercial, 4,7 para os tratamentos n° 20 e n° 50, mostrando que não foram observadas diferenças entre as frações granulométricas testadas e nem incremento quando comparado ao pH inicial do solo (Figura 13). Para o mesmo período de avaliação, nota-se que o aumento na dose do corretivo refletiu no acréscimo do pH somente para as frações menos grosseiras chegando a 5,6 para o tratamento < 0,30 mm e 5,2 para o tratamento com a aplicação do calcário comercial. Vale ressaltar que o PRNT de cada granulometria estudada foi levado em consideração para estimar a quantidade de calcário necessária. Desse modo, para a correção da necessidade de calcário, adicionou-se uma quantidade maior de calcário com a fração granulométricas mais grosseira em relação a fração mais fina, visando obter a mesma dose em ambos os tratamentos. De acordo com Mello et al. (2003), a falta de efeito nos tratamentos 20 e n° 50 pode ter ocorrido devido ao tempo ter sido insuficiente para que houvesse a hidrólise da maior parte do corretivo e a consequente liberação de HCO³⁻ e OH⁻, responsáveis pela elevação do pH do solo. O calcário é um material de baixa solubilidade e nem mesmo as irrigações periódicas a fim de manter a umidade no solo, contribuíram para que ocorresse uma rápida reação do

corretivo no solo nos tratamentos com as granulometrias mais grosseiras, necessitando assim de um tempo maior para expressar a sua capacidade de neutralizar a acidez do solo.

Observou-se que na segunda amostragem realizada aos 30 dias de incubação, os valores de pH-H₂O foram superiores aos obtidos aos 15 dias, nas duas doses testadas, mostrando que o calcário reagiu com o solo nesse período em virtude do maior tempo de solubilização. De modo geral, pode-se observar que a adição da maior dose do corretivo proporcionou os maiores incrementos no pH em relação à menor dose, independente da granulometria utilizada. No entanto, o efeito foi mais pronunciado nos tratamentos com as frações menores que 0,30 mm e no tratamento com a aplicação do calcário comercial, proporcionando a elevação do pH até o valor desejado.

Esses resultados são atribuídos a maior reação das partículas menores com o solo, beneficiada pela sua granulometria, uma vez que as partículas mais finas são mais reativas devido ao aumento da superfície de contato, permitindo que os materiais corretivos reajam com um volume maior de solo e assim favorecendo as reações de solubilização e a neutralização da acidez do solo, em comparação com as frações mais grosseiras (DEUS et al., 2014; NASCIMENTO et al., 2019). Dessa forma, verifica-se que a aplicação de 9 Mg ha⁻¹ de calcário para as frações granulométricas mais grossas, proporcionou acréscimo no pH em relação a dose de 4,5 Mg ha⁻¹, contudo, a dose integral, não diferiu estatisticamente da metade da dose. Diante disso, questiona-se a viabilidade de aplicação de doses maiores de calcário para frações granulométricas maiores. Jones e Mallarino. (2018), ao incubarem cinco diferentes frações de calcário dolomítico com o intuito de testarem o efeito do tamanho de partícula no aumento do pH-H₂O do solo ao longo de 210 dias, também verificaram que as frações mais finas do corretivo não apenas aumentaram o pH-H₂O em um menor período de tempo como também proporcionaram um maior efeito em relação as frações mais grosseiras.

Figura 13- Efeito da aplicação de calcário em diferentes granulometrias sobre o pH em água de um Nitossolo Vermelho distrófico após incubação ao longo de 120 dias.



Fonte: Elaborada pela autora, (2022).

Aos 60 dias de incubação, foi observada uma redução do pH-H₂O em todas as frações granulométricas testadas, ficando abaixo daquele determinado anteriormente ao experimento nos tratamentos nº 20 e nº 50. Resultados semelhantes foram relatados por Álvarez et al. (2009), que ao avaliarem os efeitos do tamanho de partículas e doses de calcário, também relataram que ocorreu uma redução do pH-H₂O em todos os tratamentos testados. Segundo os autores, essa reacidificação pode ser atribuída a vários fatores, sendo que o mais provável seja devido a elevação da concentração de íons H⁺ na solução do solo, devido ao aumento da decomposição da matéria orgânica, visto que o solo foi mantido próximo a capacidade de campo, revolvimento constante e temperatura ambiente.

Aos 90 dias o pH-H₂O voltou a se estabilizar, sendo que os maiores valores foram encontrados no tratamento com a fração < 0,30 mm nas duas doses testadas, chegando a 6,0 na dose recomendada pelo SMP. Para o tratamento com calcário comercial, também ocorreu incremento no pH-H₂O, o qual chegou a 5,8, somente na maior dose. Na última amostragem, realizada aos 120 dias, somente a maior dose apresentou resultados satisfatórios, uma vez que houve acréscimo nos valores de pH para 6,1 e 6,0 nos tratamentos com a granulometria < 0,30 mm e calcário comercial, respectivamente. Embora não fosse esperado, a adição do corretivo fração nº 20, possibilitou o aumento do pH-H₂O para 5,2, com uma variação de 0,3 unidades em relação aos 90 dias de incubação.

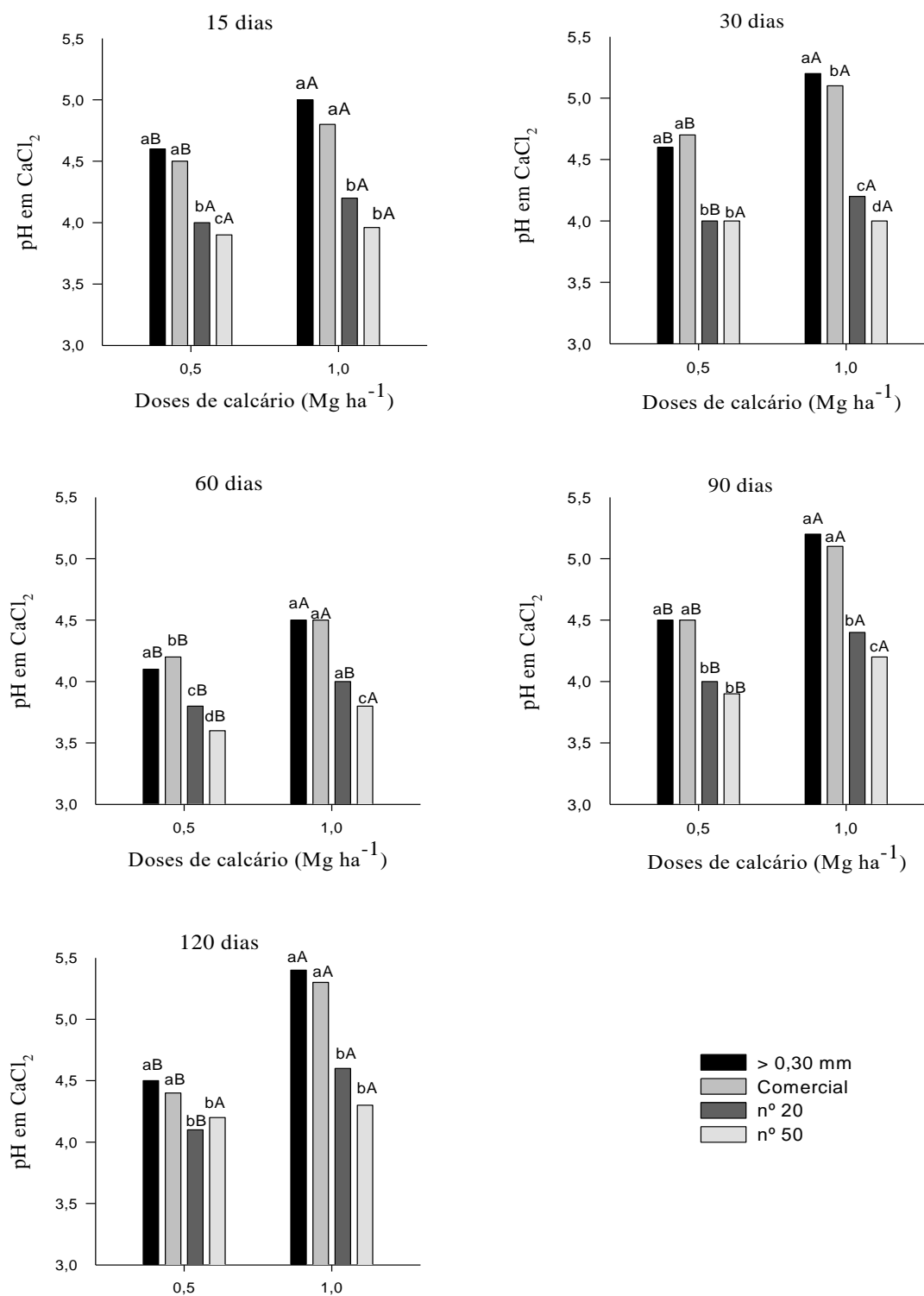
A mineralização da matéria orgânica e o aumento da concentração de sais solúveis na solução do solo, podem conduzir a erros na determinação do pH-H₂O, uma vez que as amostras são coletadas úmidas e podem sofrer algumas variações, e assim, afetar a determinação do pH. Para evitar esse tipo de problema, pode-se fazer a leitura do pH em uma solução salina diluída (CaCl₂), permitindo assim leituras mais estáveis e livres dos erros causados pelas variações ambientais (RONQUIM, 2010). Vale destacar, que em geral, os valores de pH em água são aproximadamente, 0,6 unidades maiores do que o pH-CaCl₂, podendo chegar até a 1,0 unidade em solos ácidos (TOMÉ JUNIOR, 1997; ERNANI, 2016).

A elevação do pH-CaCl₂ foi observada no tratamento com a fração mais fina < 0,30 mm e no tratamento com a aplicação de calcário comercial, enquanto as frações com partículas mais grosseiras nº 20 e nº 50, mostraram-se menos efetivas em todos os tempos de incubação (Figura 14). Quanto ao efeito das frações granulométricas de acordo com as doses, observou-se que as maiores alterações do pH-CaCl₂ ocorreram com a elevação das doses de calcário aplicadas durante o período de incubação.

A partir dos resultados obtidos, é possível observar que os 15 dias na fração < 0,30 mm e no tratamento com calcário comercial, o pH CaCl_2 sofreu um aumento de 0,6 e 1,0 unidade na metade da dose e na dose integral, respectivamente e para o tratamento com calcário comercial, o incremento foi de 0,5 e 0,8 unidades na menor e na maior dose, respectivamente. Esse comportamento foi observado até os 30 dias de incubação, apresentando uma queda na amostragem realizada aos 60 dias. A partir deste intervalo, na amostragem realizada aos 90 dias, observou-se que o pH- CaCl_2 voltou a aumentar e esse efeito foi mantido até os 120 dias de incubação, quando alcançou os valores de 5,4 e 5,3 nos tratamentos < 0,30 mm e calcário comercial, respectivamente, na dose recomendada pelo SMP e seguindo o mesmo comportamento observado para pH- H_2O .

Diante disso, é importante destacar que a fração mais fina < 0,30 mm e o calcário comercial sempre foram superiores quando comparada às frações restantes, indicando que a fração mais fina não perdeu a sua ação neutralizante ao longo do tempo. Em um trabalho avaliando a reatividade de um calcário dolomítico com diferentes granulometrias na acidez do solo, Santos Filho et al. (2018) também constataram que para as granulometrias com partículas mais finas, houve decréscimo do pH aos 60 dias e voltou a se estabilizar aos 90 dias de incubação. Ainda segundo os autores, o resultado contradiz a literatura, onde o esperado é que os tratamentos com partículas mais finas apresentem reação inicial mais elevadas e decréscimo ao longo do tempo.

Figure 14 - Efeito da aplicação de calcário em diferentes granulometrias sobre o pH em CaCl_2 de um Nitossolo Vermelho distrófico após incubação ao longo de 120 dias.



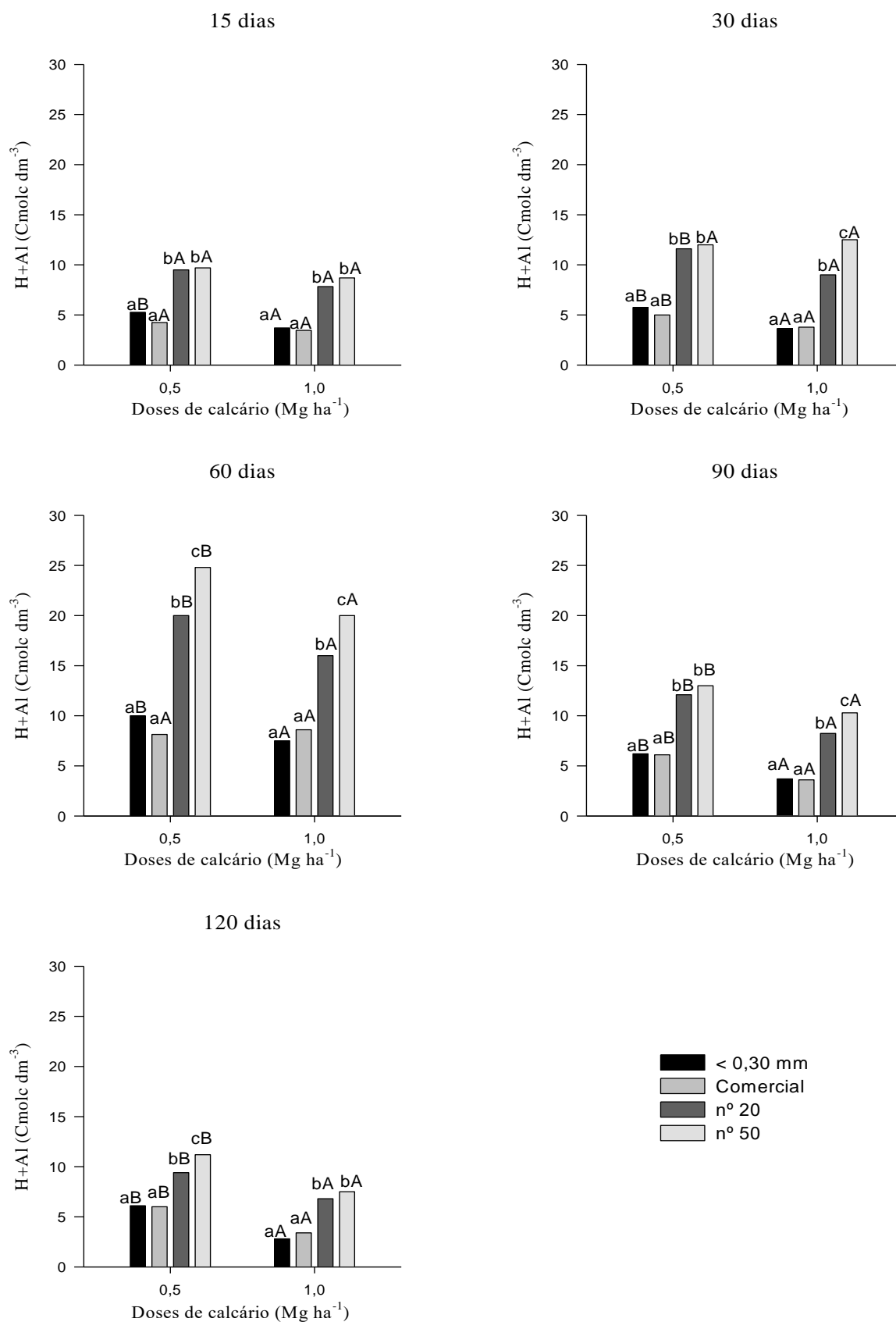
Fonte: Elaborada pela autora, (2022).

Além de influenciar no pH-H₂O e no pH-CaCl₂, as frações granulométricas, doses de calcário dolomítico e suas interações, influenciaram sobre os valores de H+Al do solo, sendo modificada em cada época de amostragem (Figura 15). Na amostragem realizada aos 15 dias de incubação, os resultados para H + Al mostraram que para a metade da dose, os tratamentos < 0,30 mm e comercial apresentaram o valor de 5,2 e 4,2 cmol_c dm⁻³ e 9,5 e 9,7 cmol_c dm⁻³ nos tratamentos n° 20 e n° 50, respectivamente. Para o mesmo período de incubação, percebe-se que o aumento da dose do corretivo influenciou na redução da H + Al nos tratamentos < 0,30 mm e n° 20 chegando a 3,7 e 7,8 cmol_c dm⁻³ respectivamente. Esse resultado não era esperado, já que frações mais grosseiras são menos reativas e precisam de mais tempo para reagir com o solo. No entanto, passou por uma posterior reacidificação, em que o índice foi de 7,8 cmol_c dm⁻³ para 9,0, 16,0 e 8,2 cmol_c dm⁻³ aso 30, 60 e 90 dias de incubação, respectivamente.

Para o tratamento < 0,30 mm, observou-se que para a dose integral do calcário houve redução da H + Al na amostragem realizada aos 30 dias de incubação. Contudo, na amostragem dos 60 dias, foi observado aumento da H + Al para todos os tratamentos, independente da dose e do tamanho de partículas avaliadas, seguindo a mesma tendência observada para o pH. Dessa forma, o comportamento da H + Al foi inversamente proporcional ao comportamento do pH e de acordo com Araújo et al. (2014), isso ocorre em razão dos efeitos da calagem sobre os íons de Al³⁺ e H⁺, que são responsáveis pela acidez do solo.

Aos 90 dias a H + Al voltou a sofrer decréscimo em todas as frações granulométricas e doses testadas, sendo que os menores valores foram observados para os tratamentos < 0,30 e comercial, contudo, não apresentaram grandes diferenças quando comparados com os resultados obtidos aos 15 dias de incubação. Na última amostragem realizada aos 120 dias houve decréscimo nos valores de H + Al, sendo que os menores valores foram encontrados nos tratamentos > 0,30 mm e comercial e somente na dose recomendada pelo SMP. Entretanto, esses valores não ficaram muito abaixo daqueles observados aos 15 dias de condução do experimento, mostrando o alto poder de tamponamento deste solo.

Figura 15 - Efeito da aplicação de calcário em diferentes granulometrias na H + Al de um Nitossolo Vermelho distrófico após incubação ao longo de 120 dias.



Fonte: Elaborada pela autora, (2022).

A eficiência relativa (ER) de cada fração granulométrica do calcário variou de acordo com as doses e como o tempo de incubação, como podemos ver na (Tabela 8). Considerando a mesma fração de tamanho de partícula do corretivo, os resultados da ER mostraram solubilidades distintas quando se comparou as doses de corretivo avaliadas. Ademais, as características físicas das frações granulométricas também afetaram a velocidade de reação, uma vez que o aumento da reatividade ocorreu com a redução do tamanho das partículas, pois, a baixa solubilidade do calcário faz com que a velocidade de neutralização da acidez dependa da área de contato entre o corretivo e o solo.

No início do período de incubação, as partículas menores que 0,30 mm e o calcário comercial apresentaram maior ER em relação as frações mais grosseiras quando se utilizou metade da dose recomendada, alcançando maior ER aos 90 dias. Para o período de 120 dias, as partículas menores que 0,30 mm sofreram uma redução na ER, sendo que o maior efeito foi encontrado no tratamento com a aplicação de calcário comercial. Já para as frações mais grosseiras, percebe-se que ocorreu um ligeiro aumento na ER aos 120 dias de incubação, no entanto, nenhum dos resultados foi suficiente para neutralizar a acidez do solo no período estudado.

Tabela 8 - Eficiência relativa (ER%) de reatividade das frações granulométricas do calcário após 120 dias de incubação.

Tratamentos	Metade da dose			Dose integral		
	15 dias	90 dias	120 dias	15 dias	90 dias	120 dias
< 0,30 mm	15,5	33,8	20,3	68,0	94,6	100
Calcário Comercial	13,5	19,0	6,7	40,5	81,0	94,6
n° 20	6,7	6,7	13,5	---	19,0	33,4
n° 50	6,7	6,7	13,5	6,7	6,7	20,3

Fonte: Elaborada pela autora, (2022).

Os resultados de ER demonstram que quando se utilizou a dose recomenda de calcário, as frações granulométricas menores que 0,30 e o tratamento com calcário comercial, apresentaram a maior reatividade aos 15 dias de incubação, atingindo os valores de 68 e 40,5%, respectivamente. Esse resultado seguiu a mesma tendência aos 90 dias, no entanto, para a menor fração a ER chegou a 100% somente aos 120 dias de

incubação. Esses resultados estão de acordo com Deus et al. (2014), que ao testarem as taxas de reatividade de partículas de silicatos, também observaram maior ER nas menores frações granulométricas de calcário dolomítico. De acordo com os autores, partículas menores que 0,30 mm apresentam maior superfície de contato com o solo, o que acaba aumentando a solubilidade do corretivo.

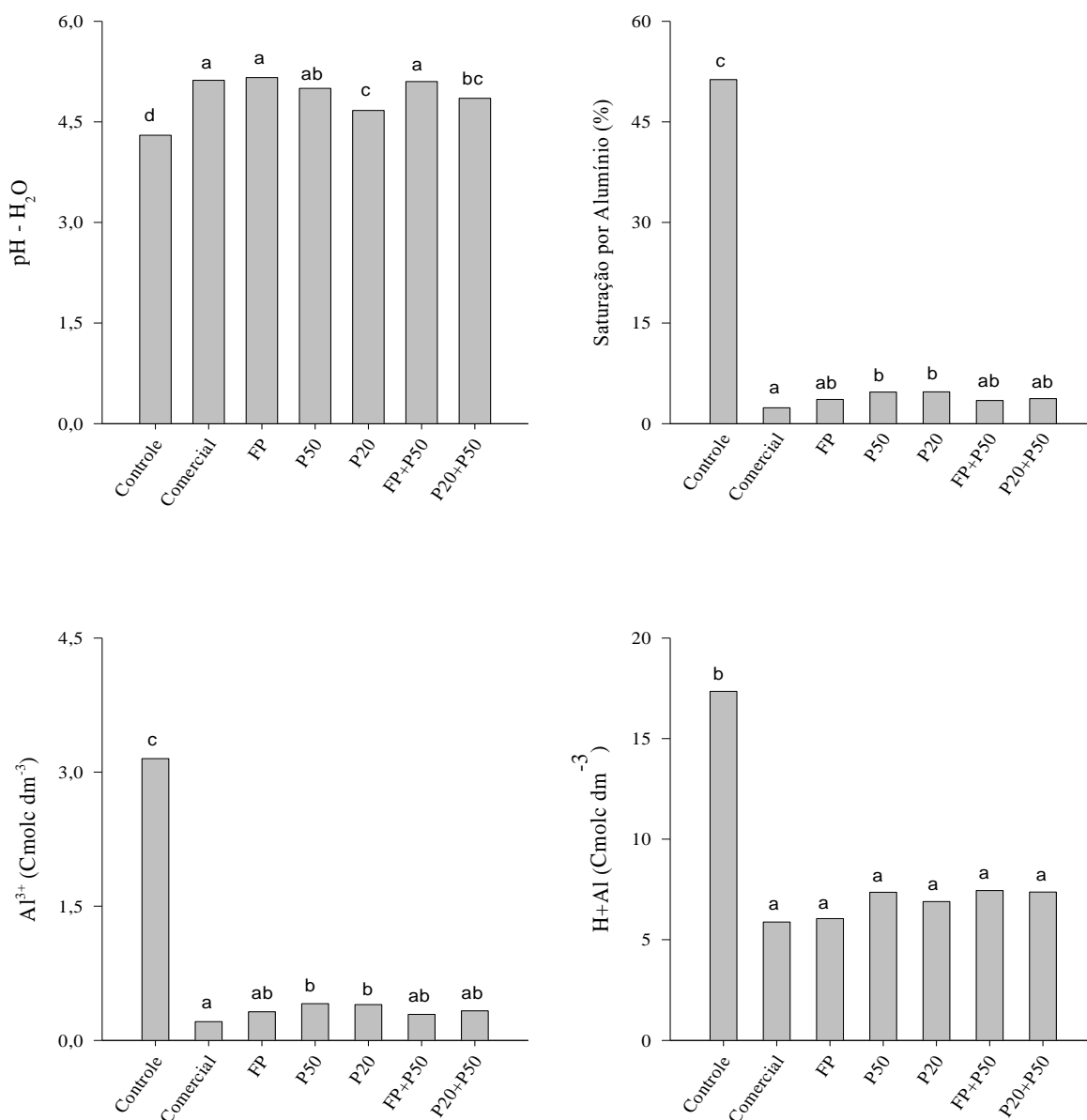
Embora não fosse esperado, o tratamento com partículas entre 2,0 e 0,84 mm, apresentou ER relativa maior que o tratamento com partículas entre 0,84 e 0,30 mm aos 90 e aos 120 dias de incubação do solo. Esses resultados se mostraram em desacordo com a legislação brasileira, sendo que os valores regulamentados atualmente apresentam 20% de reatividade para partículas entre 2,0 e 0,84 mm, 60% para partículas entre 0,84 e 0,30 mm e 100% para partículas inferiores a 0,30 mm dentro de um período de três meses. Portanto, com esses resultados fica evidente que é de fundamental importância realizar estudos em solos com outras características químicas e físicas, com o intuito de obter uma média adequada da ER das frações granulométricas do calcário.

4.4.2 Experimento II - influência das frações granulométricas na cultura do milho

4.4.2.1 Atributos Químicos do Solo

A calagem utilizando diferentes frações granulométricas alterou os componentes da acidez do solo após os cultivos sucessivos de milho Figura. O pH do solo apresentou incremento após os dois ciclos de cultivo, independente da fração granulométrica utilizada. Em um estudo avaliando os efeitos das frações granulométricas de calcário nas características químicas de um solo em condições controladas, Deus et al. (2014) também relataram aumento do pH em todos os tamanhos de partículas testadas.

Figure 16 - Efeito da aplicação de frações granulométricas de calcário nos componentes da acidez pH em água (A), alumínio trocável (B), saturação por alumínio (C) e acidez potencial (D) do Nitossolo Vermelho após dois cultivos sucessivos de milho



Fonte: Elaborado pela autora, (2022)

Em geral, os tratamentos calcário comercial, FP, FP+P50 e P50, apresentaram capacidades de neutralização da acidez do solo semelhantes, com valores de pH que variaram entre 5,0 e 5,1. Além disso, esses tratamentos mostraram valores de pH de 0,2 a 0,7 unidades superiores aos obtidos naqueles que receberam as frações mais grosseiras do corretivo e do tratamento controle, respectivamente. Em um estudo incubando cinco diferentes frações de um calcário dolomítico para testar o efeito dos tamanhos de

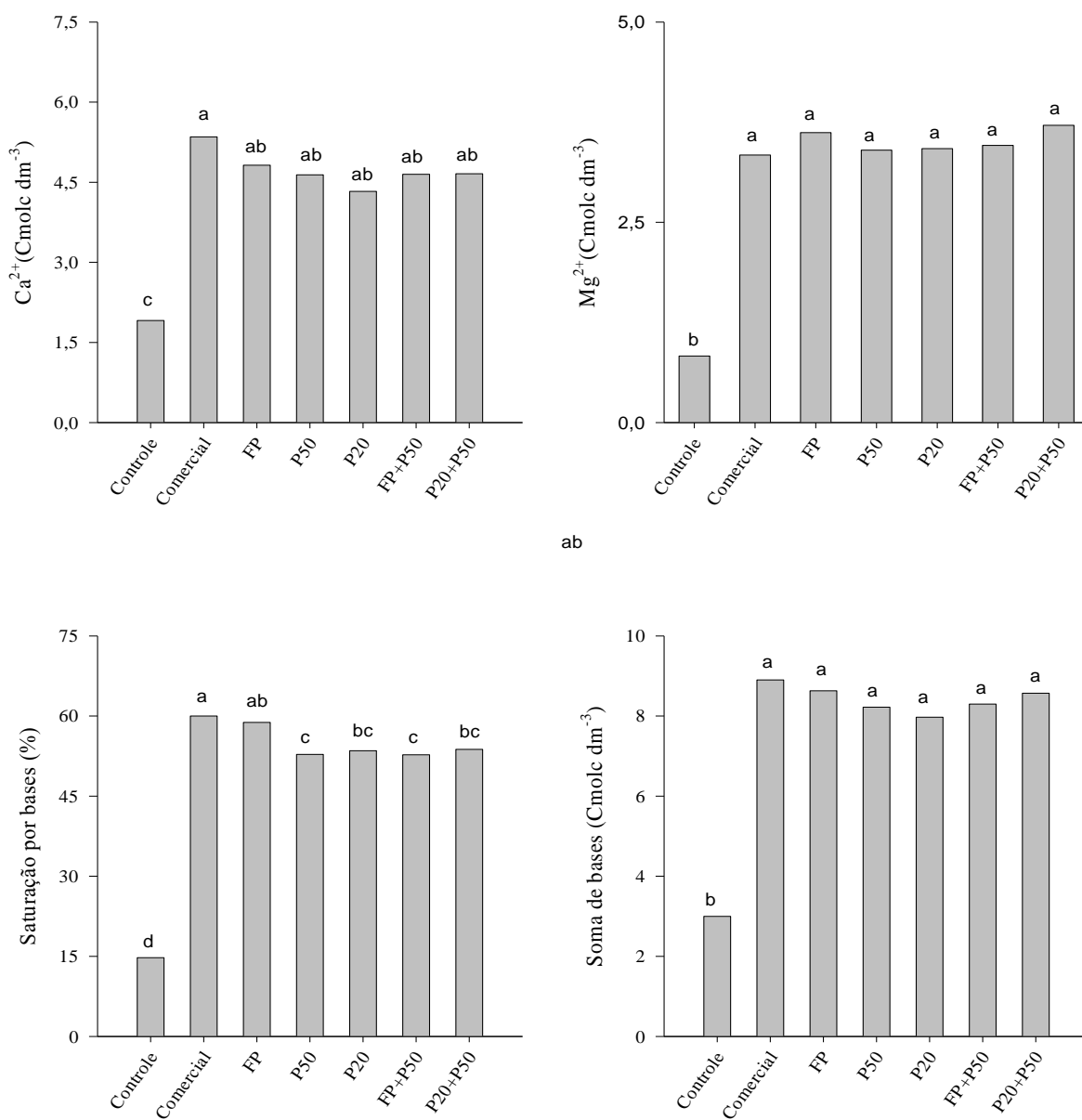
partículas no pH do solo ao longo do tempo, Jones; Mallarino (2018) relataram que as frações mais finas do corretivo aumentaram o pH do solo mais rapidamente em comparação com as outras frações granulométricas testadas. Segundo Pagani; Mallarino (2012), isso ocorre porque a capacidade de neutralização do corretivo também é influenciada pela distribuição do tamanho de partículas, pois o aumento da área superficial das partículas menores permite a reação do calcário com um volume maior de solo.

A aplicação de diferentes frações granulométricas e do calcário comercial, demonstrou praticamente a mesma eficiência na redução do Al^{3+} quando comparada ao tratamento sem adição do corretivo, reduzindo de 3,15 cmolc dm^{-3} no tratamento controle para 0,21 cmol dm^{-3} no tratamento com calcário comercial. No entanto, os teores de Al^{3+} verificados para os tratamentos P20 e P50, foram mais elevados em comparação ao calcário comercial. O mesmo comportamento foi observado para m\% e $\text{H} + \text{Al}$, onde partículas maiores que 0,30 mm, resultaram no mesmo efeito quando comparadas ao uso de partículas menores. De acordo com Soratto et al. (2019), o incremento do pH do solo decorrente da adição de calcário e do aumento da concentração de hidroxilas (OH^-) e redução da concentração de íons H^+ , acabou influenciando na redução dos teores de Al^{3+} , devido à precipitação do Al na forma de hidróxido de Al [$\text{Al}(\text{OH})_3$]. Araújo et al. (2009); Ratke et al. (2018) ao avaliarem a aplicação de partículas de calcário com diferentes graus reatividades, observaram a redução dos teores de Al^{3+} , utilizando frações menos reativas. Desse modo, fica evidente que a utilização das frações de calcário menos reativas, também é eficaz na redução dos teores de Al^{3+} , assim como as frações granulométricas com partículas menores. Esse efeito ocorreu devido a correção das doses de calcário em função do grau de reatividade de cada fração granulométrica utilizada.

Os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} aumentaram em função da adição de diferentes frações granulométricas de calcário dolomítico. A maior concentração de Ca^{2+} e Mg^{2+} ocorreu no tratamento calcário comercial, atingindo 5,34 e 3,34 cmolc dm^{-3} , respectivamente. Contudo, todos os tratamentos que receberam calagem, independentemente do tamanho de partícula utilizado, não apresentaram diferenças entre as frações do calcário e, proporcionaram a mesma eficácia no aumento do conteúdo de Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo, sendo que todos eles obtiveram teores acima daqueles considerados como ideais para o cultivo de plantas de interesse agrônômico, conforme preconizado pelo Manual de Adubação e Calagem para os Estados do RS e SC (CQFS-RS/SC, 2016). Portanto, a adição do corretivo com tamanhos de partículas maiores que 0,30 foi eficiente em suprir as

necessidades de Ca^{2+} e Mg^{2+} nos sistemas produtivos. Da mesma forma, em um estudo avaliando os efeitos do tamanho de partículas de calcário dolomítico nas propriedades químicas de um solo ácido Alvares et al. (2010); Ratke et al. (2018) também relataram que partículas maiores de calcário se assemelharam ao uso de frações mais finas para elevar os níveis de Ca^{2+} e Mg^{2+} em um solo cultivado com pastagem.

Figure 17 - Valores de cálcio (A), magnésio (B), saturação por bases (V%) (C) e soma de bases (D) após a aplicação de frações granulométricas de calcário em um Nitossolo Vermelho.



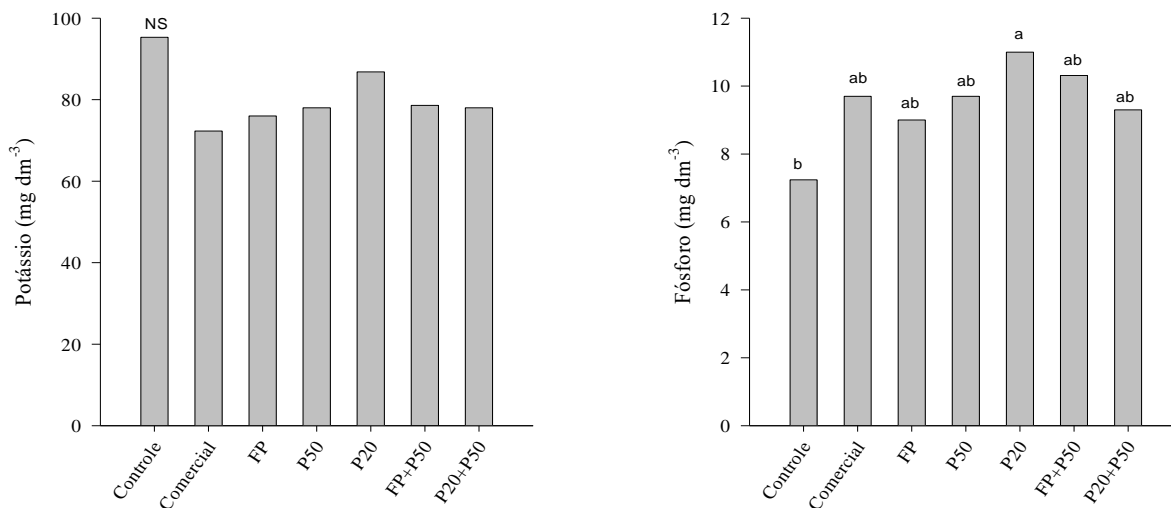
Fonte: Elaborado pela autora, (2022)

Os incrementos nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , pH e a redução da acidez do solo decorrentes da adição de calcário, influenciaram de forma positiva na saturação por bases (V%) e também na soma de bases, independente dos tamanhos de partículas empregados. Quando se compara ao tratamento controle, percebe-se que houve acréscimos nos tratamentos P50, P20, FP+P50 e P20+P50, onde a (V%) alcançou o valor médio de 53%. Já os maiores valores foram observados nos tratamentos calcário comercial e FP os quais atingiram (V%) de 60 e 58%, respectivamente. Esse resultado pode ter ocorrido em virtude do aumento do pH, que foi maior para esses tratamentos. Além disso, com a adição de calcário, os níveis de bases trocáveis aumentaram na solução do solo, diminuindo assim, a concentração de íons trocáveis (Al e H) do complexo de troca do solo (CHIMDI et al., 2012). De acordo com a Comissão de Química e Fertilidade do Solo dos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, o valor ideal de (V%) deve ser maior ou igual a 65%, contudo, esse valor não foi alcançado em nenhum dos tratamentos avaliados. Para entender esse resultado, é válido salientar sobre alto poder de tamponamento do solo, que pode ser uma explicação para o solo não ter alcançado os valores ideais de (V%), assim como observado por Araújo et al. (2009) ao avaliarem diferentes graus de reatividade do calcário nos atributos químicos de um Latossolo Vermelho. A soma de bases também foi influenciada de forma positiva pela adição de frações granulométricas de calcário. Os maiores valores de soma de bases encontrados foram de 8,9 e 8,6 cmolc dm^{-3} nos tratamentos calcário comercial e FP, respectivamente. Entretanto, não houve diferenças entre os tamanhos de partículas testados, seguindo o mesmo comportamento que ocorreu nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} .

Os dados mostram que não houve resposta no teor de K^+ no solo em função da aplicação de calcário, independentemente do tamanho de partículas do corretivo e permaneceu entre 72 e 95 mg dm^{-3} após os dois ciclos de cultivo de milho. O maior teor de P observado em relação ao tratamento controle, foi de 11 mg dm^{-3} no tratamento P20, sendo que este apresenta o maior tamanho de partícula entre as frações testadas. Contudo, este tratamento não diferiu significativamente dos outros que receberam adição do calcário, mostrando assim, que não houve diferença entre as frações granulométricas empregadas. Além disso, todos os tratamentos que receberam a calagem, atingiram os teores ideais de P para as culturas de grãos, conforme preconizado pelo Manual de Adubação e Calagem para os Estados do RS e SC (CQFS-RS/SC, 2016). De acordo com

Chimdi et al. (2012), o incremento nos teores do P pode estar atrelado ao aumento do pH devido à calagem, a qual pode ter ocasionado a maior liberação de fosfato adsorvido aos óxidos de Fe e Al do solo, tornando-o disponível para a absorção das plantas.

Figura 18 - Teores de fósforo e potássio do solo após cultivos sucessivos de milho e aplicação de frações granulométricas de calcário em um Nitossolo Vermelho.



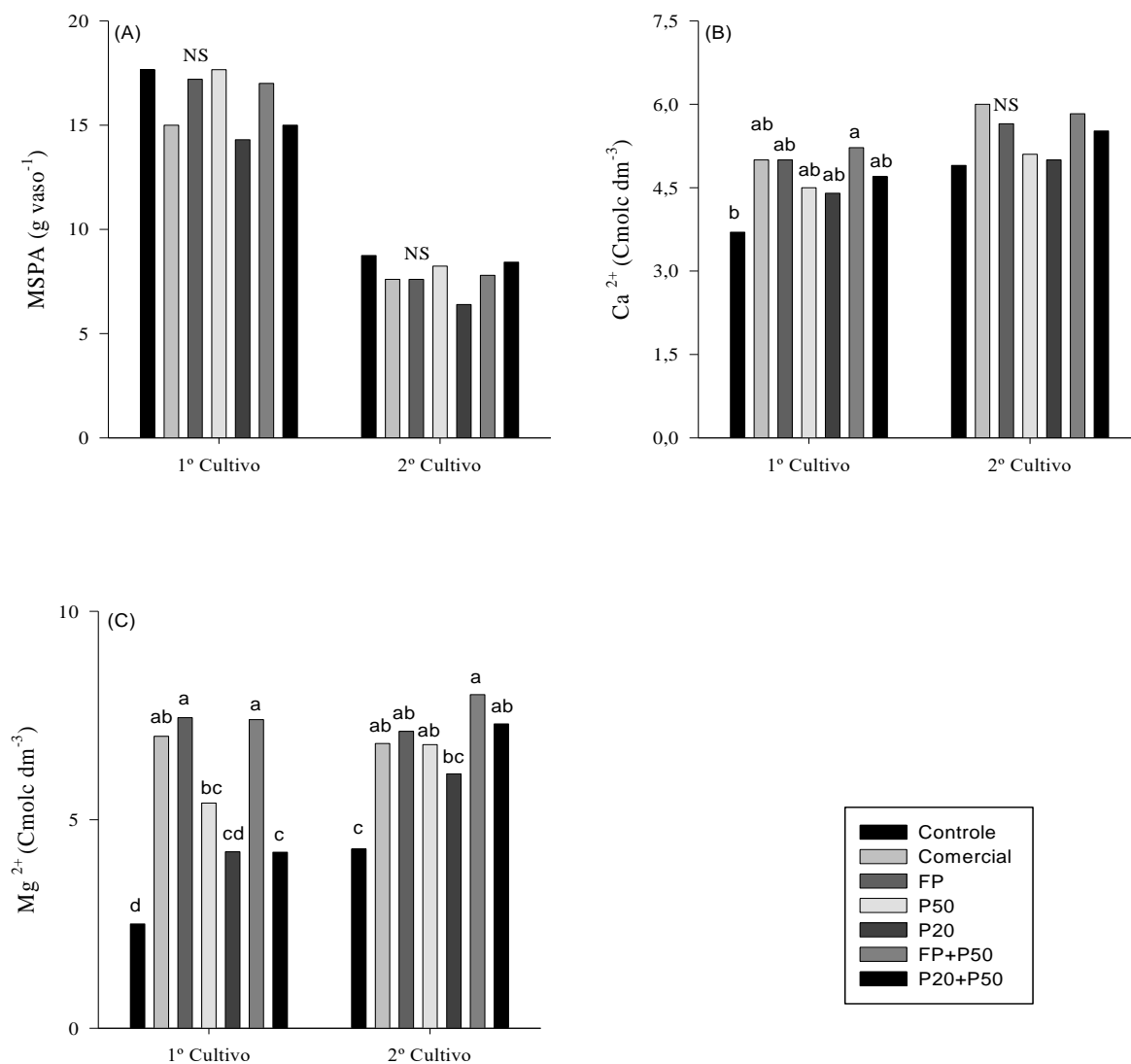
Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

4.4.2.2 *Matéria Seca da Parte Aérea e Teores de Nutrientes do Milho*

O uso de diferentes frações granulométricas de calcário, apesar de ter melhorado as características químicas do solo, não promoveu influência na produção de MSPA das plantas de milho em nenhum dos dois ciclos de cultivo. Os resultados estão de acordo com Araújo et al. (2009) que ao avaliar as alterações químicas em dois solos e na produção de matéria seca de milho pela aplicação de calcário com diferentes graus de reatividade, não encontrou diferenças entre os produtos testados quanto a produção de matéria seca. De acordo com Soratto et al. (2008), a ausência de resposta da produção de MSPA pela cultura do milho à aplicação do corretivo, pode estar relacionada aos altos teores de Ca e Mg que foram atingidos após a calagem, podendo acarretar em desequilíbrio nutricional nas plantas e prejudicar a absorção de outros nutrientes. Por outro lado, em um estudo avaliando o uso de um calcário finamente moído nas características químicas do solo e no comportamento das plantas de milho, Lange et al.

(2022) verificaram que ocorreu incremento na MSPA nas plantas de milho cultivadas em solo corrigido.

Figure 19 - Produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) das plantas de milho cultivadas em casa de vegetação após aplicação de frações granulométricas de calcário em um Nitossolo Vermelho.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Os teores de Ca, Mg, N e K dos tecidos da parte aérea de milho foram influenciados pela adição de frações granulométricas de calcário dolomítico. Observou-se resultados significativos para Ca, somente para o primeiro cultivo de milho, sendo que o maior teor foi de 5,2 g kg⁻¹ no tratamento FP+P20, diferindo somente do tratamento controle. De

modo geral, as frações com partículas maiores proporcionaram teores equivalentes de Ca nos tecidos do milho em relação ao uso do corretivo com granulometrias mais finas. Os teores de Ca considerados como adequados no tecido vegetal do milho variam de 2,3 a 8,0 g kg⁻¹. Portanto, os níveis encontrados nos dois ciclos de cultivo de milho estão dentro dos parâmetros considerados como satisfatórios para a cultura.

A calagem também alterou os teores de Mg da parte aérea das plantas de milho nos dois cultivos avaliados. No primeiro cultivo, as concentrações de Mg foram maiores nos tratamentos com a adição de partículas mais finas de calcário (< 0,30 mm) em comparação aos tratamentos com a presença de frações maiores do corretivo e no tratamento controle. Dessa forma, os maiores teores de Mg observados foram de 7,4, 7,3 e 7,0 g kg⁻¹ nos tratamentos FP, FP+P50 e calcário comercial, respectivamente. Já as menores concentrações encontradas foram de 4,22 e 2,53 g kg⁻¹ nos tratamentos controle e P20, respectivamente. Para o segundo cultivo, a maior concentração de Mg, foi observada para o tratamento FP+P50 em relação aos tratamentos controle e P20. Essas discrepâncias observadas entre os tratamentos quanto a concentração de Mg nos tecidos vegetais das partes aéreas do milho, são consistentes com os resultados encontrados por (VIADÉ et al., 2011). Os teores ideais de Mg no tecido vegetal de plantas de milho varia de 1,5 a 5,0 g kg⁻¹. Deste modo, as concentrações de Mg verificadas no primeiro e no segundo cultivo, estão dentro dos níveis considerados como adequados para a cultura, independente do tratamento avaliado.

Em relação aos teores de N nos tecidos da parte aérea do milho, os resultados obtidos mostram que houve incremento quando se aplicou calcário somente no primeiro ciclo de cultivo, independente da fração granulométrica testada. Contudo, os maiores níveis de N foram observados nos tratamentos P20, FP+P50 e P20 +P50, os quais atingiram 29,3, 28,5 e 30,7 g kg⁻¹, respectivamente. Os teores ideais de N no tecido vegetal de milho variam de 27 a 35 g kg⁻¹, desse modo, os níveis de N encontrados nestes tratamentos, estão dentro do que é considerado como satisfatório para o milho, porém, para os tratamentos controle, calcário comercial, FP e P50 as concentrações de N ficaram abaixo da suficiência limite para o crescimento da cultura. Esse incremento pode estar atrelado aos benefícios da aplicação de calcário, que resulta em melhores condições para o desenvolvimento radicular, e assim abrangendo maiores áreas de solo aproveitável, favorecendo aumentos na absorção de nutrientes, como o N (CAIRES et al., 2002; TIRITAN et al., 2016).

Tabela 9 - Teores de nitrogênio, fósforo e potássio nos tecidos vegetais das plantas de milho cultivadas em casa de vegetação após aplicação frações granulométricas de calcário em um Nitossolo Vermelho.

Cultivo	Nutriente (g kg ⁻¹)	Frações Granulométricas						
		Controle	Comercial	FP	P50	P20	FP+P50	P20+P50
Milho	N	17,88b	23,60ab	23,40ab	25,64ab	29,32a	28,50a	30,70a
	P	1,70	1,72	1,88	1,88	2,00	2,14	2,32
	K	21,92c	25,60bc	25,20bc	24,32bc	27,26abc	32,10ab	35,83a
Milho	N	26,61	29,30	24,72	23,16	29,00	25,60	29,00
	P	1,37	1,11	1,20	0,85	1,05	1,02	1,15
	K	33,11	37,90	36,50	27,33	35,90	25,71	33,20

Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Em relação a concentração de K nos tecidos vegetais de milho, somente o primeiro cultivo apresentou resultados significativos quanto a adição das frações de calcário. Os menores teores foram de 21,9, 24,3, 25,2 e 25,6 g kg⁻¹ obtidos nas plantas dos tratamentos controle, P50, FP e calcário comercial, respectivamente. As maiores concentrações foram de 27,2 g kg⁻¹ para o tratamento P20, sendo que este possui a maior fração granulométrica, 32,1 g kg⁻¹ no tratamento FP+P50 e 35,8 g kg⁻¹ no tratamento P20+P50, quando houve a mistura das frações com partículas maiores, ficando evidente que os tratamentos com a presença de frações maiores se sobressaíram em comparação aos tratamentos calcário comercial e FP, mesmo que as concentrações de Mg⁺² no solo não tenham diferido entre os tratamentos. Segundo Viadé et al. (2011) a absorção do K não depende somente da sua concentração no solo, mas também da interação desse nutriente com outros, principalmente Ca e Mg, sendo que estes podem inibir, por competição, a absorção de K pelas plantas.

4.5 CONCLUSÕES

A calagem com partículas < 0,30 mm e o calcário comercial apresentaram proporcionaram aumento do pH-H₂O e pH-CaCl₂ e redução da H+Al do solo.

Todas as frações granulométricas favoreceram a redução da $m\%$, Al^{+3} , $H + Al$ e no incremento de Ca , Mg , $V\%$ e soma de bases em comparação ao tratamento controle.

O uso de calcário com diferentes granulometrias não promoveu efeito na produção de MSPA das plantas de milho.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de doses crescentes de calcário incorporadas ao solo reduziu a atividade do Al^{3+} , principalmente nas doses de 3,0 e 6,0 $Mg\ ha^{-1}$. Além disso, a adição de calcário aumentou os teores de Ca, Mg, V% e soma de bases.

Para o primeiro e terceiro ciclo de cultivo, as maiores produções de MSPA nas plantas de milho e trigo foram observados nas maiores doses de calcário. As plantas de milho do segundo cultivo apresentaram maior acréscimo de MSPA logo na dose de 1,5 $Mg\ ha^{-1}$ e não responderam ao aumento das doses de calcário quando cultivadas em solos com teores de P elevados, mesmo com os teores de Al^{3+} acima do indicado para o cultivo de plantas.

A incorporação de calcário nas camadas a partir da superfície foi responsável pela redução do Al^{3+} no solo, aumento dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} e da saturação por bases (V%), tanto nas camadas com a incorporação do corretivo, quanto nas camadas subsequentes. Os maiores teores de nutrientes na MSPA foram observados quando se incorporou o calcário nas camadas até 10 e 20 cm, assim como a produção de MSPA.

O uso de partículas $< 0,30\ mm$ promoveu o aumento do pH-H₂O e pH-CaCl₂ e redução da H+Al. No entanto, frações de calcário maiores também mostraram efeitos positivos na redução da acidez do solo.

Após dois ciclos de cultivo de milho, a calagem com diferentes frações granulométricas foi responsável pela redução da m%, Al^{3+} , H + Al e no acréscimo de Ca, Mg, V% e soma de bases, porém, não mostrou influência sobre a produção de MSPA das plantas de milho nos dois cultivos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCARDE, J. C.; GUIDOLIN, J. A.; LOPES, A. S. **Os adubos e a eficiência das adubações**. São Paulo: ANDA, 1989. 335p. Boletim Técnico.

ALCARDE, J. C.; RODELLA, A. A. Qualidade e Legislação de fertilizantes e corretivos. In: **Tópicos em Ciência do Solo**. 3 Ed. Viçosa: SBCS, 2003. p. 292-331.

ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A. E.; CAIRES, E. F. Atributos químicos de um Latossolo do Cerrado sob plantio direto, afetados por métodos e doses de aplicação de calcário. **Revista Brasileira Ciência do Solo**. v. 29, n. 6, p. 923-934, 2005.

ALMEIDA, J. A. DE; ERNANI, P. R.; MAÇANEIRO, K. C. Recomendação alternativa de calcário para solos altamente tamponados do extremo sul do Brasil. **Ciência Rural**, v. 29, n. 4, p. 651–656, 1999.

ALVAREZ, E. et al. Limestone particle size and liming scheduling influence soil properties and pasture production. **soil science**, v. 175, n. 12, p. 601-613, 2010.

ÁLVAREZ, E.; VIADÉ, A.; FERNÁNDEZ-MARCOS, M. L. Effect of liming with different sized limestone on the forms of aluminium in a Galician soil (NW Spain). **Geoderma**, v. 152, n. 1-2, p. 1-8, 2009.

ARANTES, R. B. et al. Sorção de fósforo de efluente doméstico tratado em lodo de estação de tratamento de água e aplicação do resíduo em solo cultivado com milho. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 1, p. 175-183, 2022.

ARAUJO, G. et al. Acidez potencial de solos do Estado do Amapá estimada pelo método potenciométrico SMP. **Acta Iguazu**, v. 03, p. 57–65, 2014.

ARAÚJO, S. R.; DEMATTÊ, J. A. M.; GARBUIO, F. J. Aplicação de calcário com diferentes graus de reatividade: alterações químicas no solo cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1755–1764, 2009.

BAMBOLIM, A. et al. Calcário Líquido E Calcário Convencional Na Correção Da Acidez Do Solo. **Revista De Agricultura Neotropical**, v. 2, n. 3, p. 34–38, 2015.

BATISTA, M. A. et al. **Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral**. In: BRANDÃO FILHO, J.U.T. et al. Hortaliças-fruto. Maringá: EDUEM, 2018, p. 113-162.

BESEN, M. R. et al. Forms of lime application and use of phosphogypsum in low acid soil in Southern Brazil: Soybean-wheat yield and soil chemical properties. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 45, p. 1–23, 2021.

BLAZATTI, R. M. et al. Fitomassa Do Capim-Braquiária E Atributos Químicos De Um Latossolo Sob Compactação Induzida E Doses De Calcário. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 55368–55387, 2020.

BORTOLUZZI, E.C. et al. Soybean root growth and crop yield in response to liming at the beginning of a no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 38, n. 3, p. 262, 2014.

BOSSOLANI, J. W. et al. Long-term liming improves soil fertility and soybean root growth, reflecting improvements in leaf gas exchange and grain yield. **European Journal of Agronomy**, v. 128, 2021.

BRIGNOLI, F. M. et al. Atributos biométricos da soja influenciados pelo nível de ph do solo. **Revista Científica Rural**, v. 22, n. 2, p. 13–28, 2020.

CAIRES, E. F. et al. Changes in chemical soil characteristics and soybean response to lime and gypsum applications in a no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 2, p. 275-286, 2003.

CAIRES, E. F. et al. Soil acidity, liming and soybean performance under no-till. **Scientia Agricola**. v.65, n. 5, p. 532-540, 2008.

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

CAIRES, E.F. et al. Alterações de Características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 22, p.27-34, 1998.

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

CAIRES, E.F. et al. Surface application of gypsum in low acidic Oxisol under no-till cropping system. **Scientia Agricola**, v. 68, p. 209-216, 2011.

CARMEIS, A. C. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; CASTILHOS, A. M. Liming demand and plant growth improvements for an Oxisol under long-term no-till cropping. **The Journal of Agricultural Science**, v. 155, n. 7, p. 1093–1112, 2017.

CARVALHO, M. C. S.; NASCENTE, A. S. Calcário, gesso e efeito residual de fertilizantes na produção de biomassa e ciclagem de nutrientes de milheto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. v.44, n.4, p.370-380, 2014.

CARVALHO-PUPATTO, J. G.; BÜLL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C. Atributos químicos do solo, crescimento radicular e produtividade do arroz de acordo com a aplicação de escórias. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 12, p. 1213–1218, 2004.

CASTRO, G. S. A.; CRUSCIOL, C. A. C. Effects of surface application of dolomitic limestone and calcium-magnesium silicate on soybean and maize in rotation with green manure in a tropical region. **Bragantia**, v. 74, n. 3, p. 311–321, 2015.

CASTRO, G. S. A.; CRUSCIOL, C. A. C. Yield and mineral nutrition of soybean, maize, and congo signal grass as affected by limestone and slag. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 1, p. 673–681, 2013.

CHIMDI, A.; TSEHAI, K. K.; TADDESSE, A. M. Effects of liming on acidity-related chemical properties of soils of different land use systems in western Oromia, ethiopia. **World Journal of Agricultural Sciences**, v. 8, n. 6, p. 560-567, 2012.

CHURKA BLUM, S.; CAIRES, E. F.; ALLEONI, L. R. F. Lime and phosphogypsum application and sulfate retention in subtropical soils under no-till system. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**. v. 13, n. 2, p. 279-300, 2013.
Ciência Rural, v. 37, n. 5, p.1301-1307, 2007.

COLDEBELLA, N. et al. Desempenho do milho à elevação da participação do cálcio na CTC. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 17, n. 4, p. 443–450, 2018.

FONTANA, A.; ALVES, A. B. Desempenho do milho à elevação da participação do cálcio na CTC. **Scientia Agraria Paranaensis**, [S. l.], v. 17, n. 4, p. 443–450, 2019.

CORREA, J. C.; CRUSCIOL, C. A. C.; MAUAD, M. Doses de boro e crescimento radicular e da parte aérea de cultivares de arroz de terras altas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 30, n. 6, p. 1077-1082, 2006.

COSTA, J. J. F. et al. Atributos químicos relacionados à acidez e capacidade de troca de cátions de solos do Rio Grande do Sul com diferentes graus de intemperização. **Acta Iguazu**. v. 8, n. 2, p. 81-100, 2019.

CRAVO, M. S. et al. calagem em latossolo amarelo distrófico da amazônia e sua influência em atributos químicos do solo e na produtividade de culturas anuais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 895-907, 2012.

CRISTINA, A.; DEUS, F.; THEODORO BÜLL, L. Efi ciência de escórias de siderurgia na cultura do feijoeiro em sistema de semeadura direta Efficiency of steel slag in the common bean crop in the no-till system. v. 43, n. 10, p. 1783–1789, 2013.

CUNHA, G. O. DE M. et al. Formas de alumínio em solos Ácidos Brasileiros com teores excepcionalmente altos de Al³⁺ extraível com KCl. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 5, p. 1362–1377, 2015.

CUNHA, G. O. DE M. et al. Nutritional Efficiency and Nutrient Accumulation of Maize Cultivated in Soils With High Al-KCl Content. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 16, p. 107, 2019.

DA COSTA, C. H. M. et al. Efeitos residuais da calagem superficial em solo tropical com plantio direto. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1633–1642, 2016.

DEUS, A. C. F. et al. Eficiência de escórias de siderurgia na cultura do feijoeiro em sistema de semeadura direta. **Ciência Rural**, v.43, n.10, p.1783-1789, 2013.

DO NASCIMENTO, E. V. S.; BRASIL, E. C.; SILVA, G. R. DA. Efeito Da Escória De Siderurgia Nos Atributos Químicos De Um Latossolo Amarelo Distrófico Em Terra Alta - Pa. **Revista Agroecossistemas**, v. 11, n. 1, p. 97, 2019.

Dong, Y. et al. (2022). **Soil acidification and loss of base cations in a subtropical agricultural watershed**. *Science of the Total Environment* 827.

ECHART, C. L.; CAVALLI-MOLINA, S. Fitotoxicidade do alumínio: efeitos, mecanismo de tolerância e seu controle genético. **Revista Ciência Rural**, v. 31, n. 3, p. 531-541, 2001.

ERNANI, P. R. et al. Influence of Phosphorus and Liming Combination on Corn Yield. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 3, p. 537–544, 2000.

ERNANI, P. R. et al. Mobilidade vertical de cátions influenciada pelo método de aplicação de cloreto de potássio em solos com carga variável. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 2, p. 393–401, 2007.

ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A. Comparação de métodos analíticos para avaliar a necessidade de calcário dos solos do estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 10, p. 143-150, 1986.

ERNANI, P. R.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V. Influência da calagem no rendimento de matéria seca de plantas de cobertura e adubação verde, em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 4, p. 897–904, 2001.

ERNANI, P.R. **Química do Solo e Disponibilidade de Nutrientes**. 2. ed. Lages: O Autor, 2016. 254 p.

FLORA, L. P. D. et al. mobilidade de cátions e correção da acidez de um cambissolo em função da aplicação superficial de calcário combinado com sais de potássio. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 37, p. 1591-1598, 2007.

FRANCHINI, J. C. et al. Organic composition of green manures during growth and its effect on cation mobilization in an acid Oxisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. v. 34, n. 13, p. 2045-2058, 2003.

FREIRIA, A. C. et al. Alterações em atributos químicos do solo pela aplicação de calcário na superfície ou incorporado. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 30, n. 2, p. 285–291, 2008.

GOMES, F. T. et al. Influência de doses de calcário com diferentes relações cálcio:magnésio na produção de matéria seca e na composição mineral da alfafa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 12, p. 1779-1786, 2002.

GRANT, C. A. et al. **A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta.** Canadá: POTAFOS 2001. 5 p (POTAFOS. Circular Técnica, 95).

GUIMARÃES, C. D. C.; FLORIANO, E. P.; VIEIRA, F. C. B. Chemical constraints to initial growth of *Eucalyptus saligna* in sandy soils of Pampa Gaúcho: a case study. **Ciência Rural**. v. 45, n. 7, p. 1183-1190, 2015.

HOLZSCHUH, J. M., **Eficiência de calcário calcítico e dolomítico na correção da acidez de solos sob plantio direto.** 2007. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

JORIS, H. A. W. et al. Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system. **Plant and Soil**, v. 365, n. 1–2, p. 409–424, 2013.

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**, v. 162, p. 68–77, 2016.

KAMINSKI, J. et al. Estimativa da acidez potencial do solo e seu papel no cálculo da demanda de cal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 1107-1113, 2002.

KOCHIAN L.V. et al. Plant adaptation to acid soils: The molecular basis for crop aluminum resistance. **Revista Plant Biology**. v. 66, n. 1, p. 571-598, 2015.

LANGE, A. et al. Incubação De Calcário Finamente Moído E Características Químicas Do Solo Sob Cultivo De Soja E Milho. **Nativa**, v. 10, n. 4, p. 585–594, 2022.

LEAL, A. J. F. et al. Aplicação De Calcário E Culturas De Cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32 n. 1, p. 2771–2777, 2008.

MAIA, C. E. et al. Teores foliares de nutrientes em meloeiro irrigado com águas de diferentes salinidades. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 1, p. 292–295, 2005.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas.** Piracicaba: Ceres, 2006. 638p.

MALLARINO, A.; JONES, J. R. Corn and Soybean Grain Yield Response to Different Phosphorus Fertilization Rates and Soil-Test Phosphorus Levels. **Farm Progress Reports**, v. 2017, p.113, 2018.

MARASCHIN, L.; SCARAMUZZA, J. F.; VIEIRA, C. R. Incubação Do Calcário E As Características Químicas De Solos Com Texturas Diferentes. **Nativa**, v. 8, n. 1, p. 43, 2020.

MARSCHNER, P. et al. **Mineral Nutrition of Higher Plants.** In: Initial Development of Cowpea Bean Fertilized with Natural Phosphate in the Brazilian Cerrado Soil. 3rd Edition, Academic Press, Cambridge, 649 p.2012.

MELLO, J. C. A. et al. Alterações nos atributos químicos de um latossolo distroférrico decorrentes da granulometria e doses de calcário em sistemas plantio direto e convencional, v. 27, n. 1, p. 553-561, 2003.

MELO, L. C. A. et al. Nutrição e produção de matéria seca de milho submetido a calagem e adubação sulfatada. **Pesquisa agropecuária tropical**. v. 41, n. 2, p. 193-199, 2011.

MELO, R. M. et al. Calagem e textura do substrato afetam o desenvolvimento de *Campomanesia adamantium* (Cambess.) O. Berg. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 1, p. 101–110, 2019.

MIRANDA, L. N.; MIRANDA, J. C. C.; REIN, T. A.; GOMES, A. C. Utilização de calcário em plantio direto e convencional de soja e milho em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 40, n. 6, p. 563-572, 2005.

NATALE, W. et al. Acidez Do Solo E Calagem Em Pomares. **Revista Brasileira Fruticultura**, v. 34, n. 4, p. 1294–1306, 2012.

NOLLA, A. et al. Correction of soil acidity and availability of phosphorus and potassium in an oxisol submitted to surfaced and incorporated liming. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 3, n. 3, p. 2478–2487, 2020.

NUNES, M. R. et al. Lime movement through highly weathered soil profiles. **Environmental Research Communications**, v. 1, n. 11, 2019.

PÁDUA, T. R. P. DE; SILVA, C. A.; MELO, L. C. A. Calagem em latossolo sob influência de coberturas vegetais: neutralização da acidez. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 5, p. 869–878, 2006.

PAGANI, A.; MALLARINO, A.P. Soil pH and crop grain yield as affected by the source and rate of lime. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, p. 1877-1886, 2012.

PARAHYBA, R. E. **Calcário agrícola**. Agencia Nacional de Mineração (DNPM), p.536-545, 2013.

PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo: decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32: 911-920, 2008..

PAVINATO, Paulo Sérgio. **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná**. Curitiba: SBCS/NEPAR. . Acesso em: 14 fev. 2023. , 2017.

PES, L. Z.; ARENHARDT, M. H. Fisiologia vegetal. Santa Maria – RS, 2015.

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

RAHMAN, A. R. et al. Importance of Mineral Nutrition for Mitigating Aluminum Toxicity in Plants on Acidic Soils: Current Status and Opportunities. **International journal of molecular sciences**. v. 19, n. 10, p. 3073, 2018.

RAMOS, L. A. et al. Reatividade de corretivos da acidez e condicionadores de solo em colunas de lixiviação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 30, n. 5. p. 849-857, 2006.

RATKE, R. F. et al. Soil's chemical properties and radicular morphology of soybean after the application of different limestone granulometries. **Revista em Agronegocio e Meio Ambiente**, v. 14, n. 2, p. 469–481, 2021.

RATKE, R. F. et al. Soil's chemical properties and radicular morphology of soybean after the application of different limestone granulometries. **Revista em Agronegocio e Meio Ambiente**, v. 14, n. 2, p. 469–481, 2021.

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**, v. 313, p. 7–16, 1 mar. 2018.

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

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**, v. 39, n. 6, p. 1723–1736, 2015.

RONQUIM, C. C. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento Embrapa**, 2010. Campinas.

ROSADO, T. L. et al. Fontes e doses de nitrogênio e alterações nos atributos químicos de um Latossolo cultivado com capim-mombaça. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 3, p. 840–849, 2014.

RUTKOWSKA, B.; SZULC, W.; HOCH, M.; SPYCHAJ-FABISIĄK, E. Forms of Al in soil and soil solution in a long-term fertilizer application experiment. *Soil Use Management*, v. 31, n.1, p.114-120, 2015.

SANTOS-FILHO, R. R. et al. Avaliação da reatividade de corretivos com diferentes granulometrias na acidez em argissolos Evaluation of corrective reactivity with different granulometries in acidity in oxisols. **Revista Ambientale**, v. 2, p. 30–38, 2018.

SCHENFERT, T. A. et al. Lime and gypsum in the implantation no-till system promote the nutrition and yield of soybean. **Journal of Plant Nutrition**, v. 43, n. 6, 41-654, 2020.

SILVA, L. Á. DA; SCARIOT, A. Comunidade arbórea de uma floresta estacional decídua sobre afloramento calcário na Bacia do rio Paraná. **Revista Árvore**, v. 28, n. 1, p. 61–67, 2004.

SILVA, M. V. T. DA. et al. Influência dos nutrientes na formação da massa seca da melancia sem sementes Influence of the nutrients in the formation of the dry mass of seedless watermelon. **Revista ACSA**, v. 10, n. 3, p. 31–40, 2014.

SILVA, M. V. T. et al. Influência dos nutrientes na formação da massa seca da melancia sem sementes. **Revista ACSA**, v. 10, n. 3, p. 31–40, 2014.

SORATTO, R. P. et al. Reactivity of Sedimentary and Metamorphic Limestones of Different Particle Sizes under Controlled Conditions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 50, n. 4, p. 464–473, 2019.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Dolomite and phosphogypsum Surface application Effects on anual crops nutrition and yield. **Agronomy Journal**, v. 100, p.261-270, 2008.

SOUZA, R. S.; CHAVES, L. H. G. Efeito do agrosilício e calcário na disponibilidade de fósforo em Argissolo e Latossolo. **Magistra**, v.27, n. 1, p. 1-13, 2015.

SUMNER, M.E.; NOBLE, A. D. Soil acidification: the world story. In: RENGEL, Z (Ed). **Handbook of Soil Acidity**. New York: Marcel Dekker, 2003. p. 1-28.

TANAMATI, F. Y. et al. Produção e caracterização radicular de alfafa (*Medicago sativa* L .) em função da calagem e gessagem Production and root characterization of alfalfa (*Medicago sativa* L .) related to lime and gypsum. p. 126–131, 2013.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C. Escolha do corretivo da acidez do solo. In: KAMINSKI, J. **Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto**. Pelotas: SBCS - Núcleo Regional Sul, 2000. p.95-113.

TINOCO, S. M. S. et al. **Avaliação do sistema radicular de genótipos de trigo em solução nutritiva**. Passo Fundo: CNPMS 2014. 10 p (EMBRAPA - CNPMS. Circular Técnica, 28).

TINOCO, S. M. S. et al. **Avaliação do sistema radicular de genótipos de trigo em solução nutritiva**. Passo Fundo: CNPMS 2014. 10 p (EMBRAPA - CNPMS. Circular Técnica, 28).

TIRITAN, C. S. et al. Tillage system and lime application in a tropical region: Soil chemical fertility and corn yield in succession to degraded pastures. **Soil and Tillage Research**. v.155, p. 437-447, 2016.

VANDA-SEBASTIÃO, J. S. et al. Aplicação de doses crescentes de calcário por incubação nos solos da chianga-huambo, Angola. **Revista Cubana de Química**, v. 31, n. 2, p. 258–282, 2019.

VARGAS, J. P. R. et al. Application forms and types of soil acidity corrective: Changes in depth chemical attributes in long term period experiment. **Soil and Tillage Research**, v. 185, n. 1000, p. 47–60, 2019.

VIADÉ, A. et al. Effect of particle size of limestone on Ca, Mg and K contents in soil and in sward plants. **Scientia Agrícola**, v. 68, n. 2, p.200-208, 2011.

VON UEXKÜLL, H. R.; MUTERT, E. (1995). **Global extent, development and economic impact of acid soils. Plant Soil** 171, 1–15.

YAO, H.Y.; BOWMAN, D.; RUFTY, T.; SHI, W. Interactions between N fertilization, grass clipping, addition and pH in turf ecosystems: implications for soil enzyme activities and organic matter decomposition. **Soil Biology and Biochemistry**, v.41, p.1425-1432, 2009

ZANDONÁ, R.R.; BEUTLER, A.N.; BURG, G.M.; BARRETO, C.F.; SCHMIDT, M.R. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. Pesquisa. **Agropecuária Tropical**, v.45, n.2, p.128-137, 2015.

ANEXO A – pH DO SOLO APÓS A INCUBAÇÃO DO SOLO COM DOSES DE CALCÁRIO

Doses de Calcário (Mg ha⁻¹)			
0	0,25	0,50	1,0
5,1	5,2	5,5	6,0